

Plan de prévention des risques mouvements de terrain

Affaissement et effondrement liés aux anciennes carrières
et à la dissolution du gypse

Retrait-gonflement des argiles

APPROUVÉ PAR ARRÊTÉ PRÉFECTORAL DU 22 AVRIL 2011



SOMMAIRE

1 INTRODUCTION.....	6
2 L'ALÉA MOUVEMENT DE TERRAIN LIÉ AUX ANCIENNES CARRIÈRES ET À LA DISSOLUTION DU GYPSE.....	8
2.1 PRÉSENTATION DU CONTEXTE GÉOLOGIQUE.....	8
2.1.1 <i>Géologie de Montreuil appliquée aux carrières et aux dissolutions de gypse.....</i>	<i>8</i>
2.1.2 <i>Conséquence de l'hydrologie sur les carrières.....</i>	<i>10</i>
2.1.3 <i>Exploitations des matériaux et dissolutions.....</i>	<i>11</i>
2.1.3.1 <i>Matériaux exploités et taux de défruitement.....</i>	<i>11</i>
2.1.3.2 <i>Dissolutions du gypse.....</i>	<i>13</i>
2.2 DESCRIPTION DES DÉSORDRES.....	14
2.2.1 <i>Les différents types de désordres.....</i>	<i>15</i>
2.2.1.1 <i>Les affaissements.....</i>	<i>15</i>
2.2.1.2 <i>Les fontis.....</i>	<i>16</i>
2.2.1.3 <i>Les effondrements généralisés.....</i>	<i>18</i>
2.2.1.4 <i>Les zones de karst.....</i>	<i>18</i>
2.2.2 <i>Facteurs aggravant le processus de dégradation des carrières.....</i>	<i>19</i>
2.3 PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE D'ALÉA RÉALISÉE PAR L'INSPECTION GÉNÉRALE DES CARRIÈRES DE LA VILLE DE PARIS (IGC).....	19
2.3.1 <i>Méthodologie.....</i>	<i>19</i>
2.3.2 <i>Inventaire des carrières à ciel ouvert connues à Montreuil.....</i>	<i>21</i>
2.3.2.1 <i>Les sablières.....</i>	<i>21</i>
2.3.2.2 <i>Les carrières de glaises vertes.....</i>	<i>21</i>
2.3.2.3 <i>Les carrières de gypse.....</i>	<i>22</i>
2.3.3 <i>Inventaire des carrières souterraines connues à Montreuil.....</i>	<i>23</i>
2.3.3.1 <i>Les carrières de travertins de Brie.....</i>	<i>23</i>
2.3.3.2 <i>Les carrières de gypse ludien.....</i>	<i>24</i>
2.3.4 <i>Les karsts gypseux identifiés à Montreuil.....</i>	<i>26</i>
2.4 CARACTÉRISATION ET CARTOGRAPHIE DES ALÉAS ANCIENNES CARRIÈRES ET DISSOLUTION DU GYPSE.....	26

2.4.1	<i>Évaluation de l'aléa pour les carrières.....</i>	26
2.4.2	<i>Caractérisation et cartographie de l'aléa pour les carrières.....</i>	27
2.4.2.1	<i>Zones de protection et marge de reculement.....</i>	28
2.4.2.2	<i>Détail des aléas.....</i>	29
3	L'ALÉA MOUVEMENT DE TERRAIN LIÉ AU RETRAIT-GONFLEMENT DES SOLS ARGILEUX	32
3.1	PRÉSENTATION DU PHÉNOMÈNE NATUREL.....	32
3.1.1	<i>Introduction au phénomène de retrait-gonflement.....</i>	32
3.1.1.1	<i>La nature du sol.....</i>	33
3.1.1.2	<i>L'état de contrainte du sol et/ou sa modification.....</i>	33
3.1.1.3	<i>Le changement de l'environnement hydrique du sol.....</i>	33
3.1.2	<i>Facteurs intervenant dans le processus.....</i>	33
3.2	DESCRIPTION DES DÉSORDRES.....	34
3.2.1	<i>Mécanisme expliquant l'apparition des désordres.....</i>	34
3.2.1.1	<i>Pendant la sécheresse.....</i>	34
3.2.1.2	<i>Au retour des pluies.....</i>	35
3.2.2	<i>Manifestations des désordres affectant les constructions.....</i>	35
3.2.2.1	<i>Sur le gros-œuvre.....</i>	35
3.2.2.2	<i>Sur le second-œuvre.....</i>	36
3.2.2.3	<i>Sur les aménagements extérieurs.....</i>	36
3.3	PRÉSENTATION DE LA MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE D'ALÉA RÉALISÉE PAR LE BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES (BRGM).....	37
3.3.1	<i>Détermination du cadre géographique et géologique départemental.....</i>	38
3.3.2	<i>Caractérisation lithologique, minéralogique et géotechnique des formations.....</i>	39
3.3.3	<i>Examen des autres facteurs de prédisposition ou de déclenchement.....</i>	40
3.3.4	<i>Recensement et localisation géographique des sinistres.....</i>	40
3.3.4.1	<i>Répartition géographique des sinistres.....</i>	40
3.3.4.2	<i>Détermination de la densité de sinistres selon le type de formation géologique... ..</i>	41
3.4	CARACTÉRISATION ET CARTOGRAPHIE DE L'ALÉA RETRAIT-GONFLEMENT DES SOLS ARGILEUX.....	42
3.4.1	<i>Détermination du degré de susceptibilité.....</i>	42
3.4.2	<i>Détermination du critère « densité de sinistres ».....</i>	43
3.4.3	<i>Détermination du degré d'aléa.....</i>	44
3.5	CONCLUSIONS DE L'ÉTUDE.....	45
4	CARTES DES DIFFÉRENTS ALÉAS MOUVEMENTS DE TERRAIN.....	46

5 ANALYSE DES ENJEUX.....	47
5.1 ENJEUX D'AMÉNAGEMENT GLOBAL.....	47
5.1.1 <i>Le développement de l'offre de logements autour du tramway Noisy-le-Sec / Val de Fontenay.....</i>	<i>47</i>
5.1.2 <i>Le développement de l'offre de logements, équipements et commerces dans le centre-ville : ZAC Coeur de Ville.....</i>	<i>47</i>
5.1.3 <i>Le développement du tertiaire et la réhabilitation de l'habitat en lien avec le grand projet de renouvellement urbain (GPRU) de la Porte de Montreuil dans le secteur du bas Montreuil et de la rue de Paris.....</i>	<i>48</i>
5.1.4 <i>La reconstitution de l'offre de logements du fait du processus de rénovation urbaine dans le quartier de Bel Air / Grands Pêchers.....</i>	<i>48</i>
5.2 ENJEUX DE MOBILITÉ.....	49
5.2.1 <i>Le développement des liaisons de rocade : tramway Noisy-le-Sec / Val de Fontenay et projet de rocade ferrée périphérique.....</i>	<i>49</i>
5.2.2 <i>Le maillage avec les liaisons radiales : prolongements des lignes 9 et 11.....</i>	<i>49</i>
5.3 ENJEUX PAYSAGERS.....	50
5.3.1 <i>La prise en compte des risques dans les aménagements des espaces verts (parc des Guilands et parc des Beaumonts).....</i>	<i>50</i>
5.3.2 <i>La valorisation du site classé et du secteur des murs à pêches.....</i>	<i>50</i>
5.4 ENJEUX LIÉS AUX ÉQUIPEMENTS SENSIBLES.....	50
5.5 ENJEUX HUMAINS.....	50
5.5.1 <i>Données générales.....</i>	<i>50</i>
5.5.2 <i>Recensement des établissements sensibles.....</i>	<i>51</i>
5.5.3 <i>Analyse de la carte des enjeux de population.....</i>	<i>51</i>
6 ÉLABORATION DU ZONAGE RÉGLEMENTAIRE.....	52
6.1 MÉTHODOLOGIE D'ÉLABORATION DU ZONAGE RÉGLEMENTAIRE.....	52
6.1.1 <i>Le risque d'affaissement et d'effondrement liés à la présence d'anciennes carrières, trois classes d'exposition ont été définies :.....</i>	<i>52</i>
6.1.1.1 <i>Carrières de gypse et sablières.....</i>	<i>52</i>
6.1.1.2 <i>Carrières de Travertins de Brie.....</i>	<i>52</i>
6.1.2 <i>Concernant le risque d'affaissement et d'effondrement liés à la dissolution du gypse, un seul niveau de risque a été défini :.....</i>	<i>52</i>
6.1.3 <i>Concernant le risque lié au retrait-gonflement des sols argileux, deux classes d'exposition ont été définies :.....</i>	<i>53</i>
6.2 CROISEMENT MULTIRISQUES.....	53
6.3 OBJECTIFS DE PRÉVENTION POUR CHAQUE ZONE.....	54

1 INTRODUCTION

Cette note présente l'ensemble des éléments utiles à la compréhension du plan de prévention des risques mouvements de terrain (PPRMT) sur la commune de Montreuil-sous-Bois.

Ce PPRMT comprend trois grandes parties :

- la note de présentation comprenant la description des phénomènes naturels de mouvements de terrain liés aux anciennes carrières et/ou à la dissolution du gypse et liés au retrait-gonflement des sols argileux, la détermination des aléas correspondants, l'analyse des enjeux des territoires exposés à ces risques et la méthode d'élaboration du zonage réglementaire. Cette note est accompagnée de la cartographie des aléas ;
- le zonage réglementaire, obtenu à partir du croisement effectué entre les différents zonages des aléas et tenant compte des enjeux recensés ;
- un règlement s'appliquant sur chacune des zones réglementaires définies.

A ces trois documents réglementaires s'ajoutent deux documents complémentaires, intégrés pour une meilleure compréhension de la problématique. Il s'agit :

- du préambule ;
- des annexes.

Bien que la commune de Montreuil ait mis en place une consultation de l'Inspection générale des carrières de la Ville de Paris pour les autorisations d'urbanisme situées dans une zone qu'elle a identifiée comme soumise aux risques liés aux carrières souterraines et à ciel ouvert, il n'existe pas d'arrêté préfectoral définissant officiellement ce secteur en tant que « périmètre de risque pris en application de l'ancien article R.111-3 du code de l'urbanisme et valant PPR approuvé ».

Par arrêté préfectoral n° 04-1510 du 31 mars 2004, l'Etat, représenté par le Préfet de Seine-Saint-Denis, a prescrit un plan de prévention des risques mouvements de terrain sur la commune de Montreuil. Les risques naturels pris en compte dans le PPR mouvements de terrain sont les suivants :

- Affaissement-effondrement liés aux anciennes carrières ;
- Affaissement-effondrement liés à la dissolution du gypse ;
- Retrait-gonflement des sols argileux.

Dans le cadre de l'élaboration de ce PPR sur la commune de Montreuil, la direction départementale de l'Équipement (DDE) de la Seine-Saint-Denis, qui est chargée d'élaborer et de mettre en application les PPR, a retenu plusieurs experts pour l'assister dans cette mission, en particulier pour définir les aléas de mouvements de terrain et pour lui apporter un soutien technique lors de l'élaboration des projets réglementaires.

Ainsi, la DDE a fait appel :

- à l'Inspection générale des carrières de la Ville de Paris (IGC) pour la caractérisation et cartographie des aléas mouvements de terrain liés aux anciennes carrières souterraines ou à ciel ouvert et des aléas liés à la dissolution du gypse sur la commune de Montreuil ;
- au bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) pour la caractérisation et cartographie des aléas mouvements de terrain liés au retrait-gonflement des sols argileux (dans le cadre de sa mission de service public sur les risques naturels, le BRGM a élaboré une méthodologie de cartographie de l'aléa retrait-gonflement à l'échelle départementale et communale) ;
- au laboratoire régional de l'Est parisien (LREP) pour une mission d'assistance technique à l'élaboration des projets réglementaires prenant en compte l'ensemble des risques de mouvements de terrain.

Les risques de mouvements de terrain, qu'ils soient liés à la présence de cavités souterraines ou au retrait-gonflement des sols argileux, sont à l'origine de désordres pouvant mettre en danger des personnes et provoquer des dégâts matériels importants.

Concernant le risque lié à la présence d'anciennes carrières ou de dissolution du gypse, les coûts des dommages sont très difficilement estimables car le risque est très ponctuel et n'affecte parfois que certaines constructions isolées. Cependant, la présence de cavités souterraines, pouvant occasionner des affaissements, des tassements mais aussi des effondrements de grande ampleur se propageant de manière brutale et soudaine, présente un réel danger pour les vies humaines. Les ouvrages sont également vulnérables et peuvent être détruits entièrement. En plus des risques sur les vies humaines et les infrastructures, ces mouvements de terrain ont des conséquences économiques. Leur survenue entraîne des coûts dus aux réparations, ainsi qu'éventuellement à l'arrêt des activités du secteur concerné. La mise en place de mesure de protection, telle que le comblement des carrières ou la consolidation du sous-sol entraîne également des dépenses revenant en général au propriétaire du terrain. Si aucune protection ne s'avère efficace, le coût de l'expropriation et du relogement des populations menacées est à prendre en compte.

Concernant le risque de retrait-gonflement des sols argileux, la lenteur et la faible amplitude des mouvements de sol le rendent sans danger pour l'homme. Néanmoins, l'apparition de tassements différentiels peut avoir des conséquences importantes sur les bâtiments à fondations superficielles. Le phénomène de retrait-gonflement a été intégré en 1989 au régime des catastrophes naturelles mis en place par la loi du 13 juillet 1982. Depuis le premier arrêté de catastrophe naturelle pris en 1989, ce risque naturel est devenu en France la deuxième cause d'indemnisation derrière les inondations, et le montant total des remboursements effectués à ce titre était évalué à la fin de l'année 2003 par la caisse centrale de réassurance (CCR) à environ 4 milliards d'euros, dont 1 milliard d'euros pour la seule année 2003, ce qui correspond à plusieurs centaines de milliers de maisons sinistrées sur l'ensemble de la France.

2 L'ALÉA MOUVEMENT DE TERRAIN LIÉ AUX ANCIENNES CARRIÈRES ET À LA DISSOLUTION DU GYPSE

L'existence d'anciennes carrières souterraines abandonnées dans le département de Seine-Saint-Denis et sur la commune de Montreuil, pouvant être à l'origine de mouvements de terrain, constitue un risque pour les aménagements existants et une contrainte vis-à-vis de l'occupation ultérieure du sol.

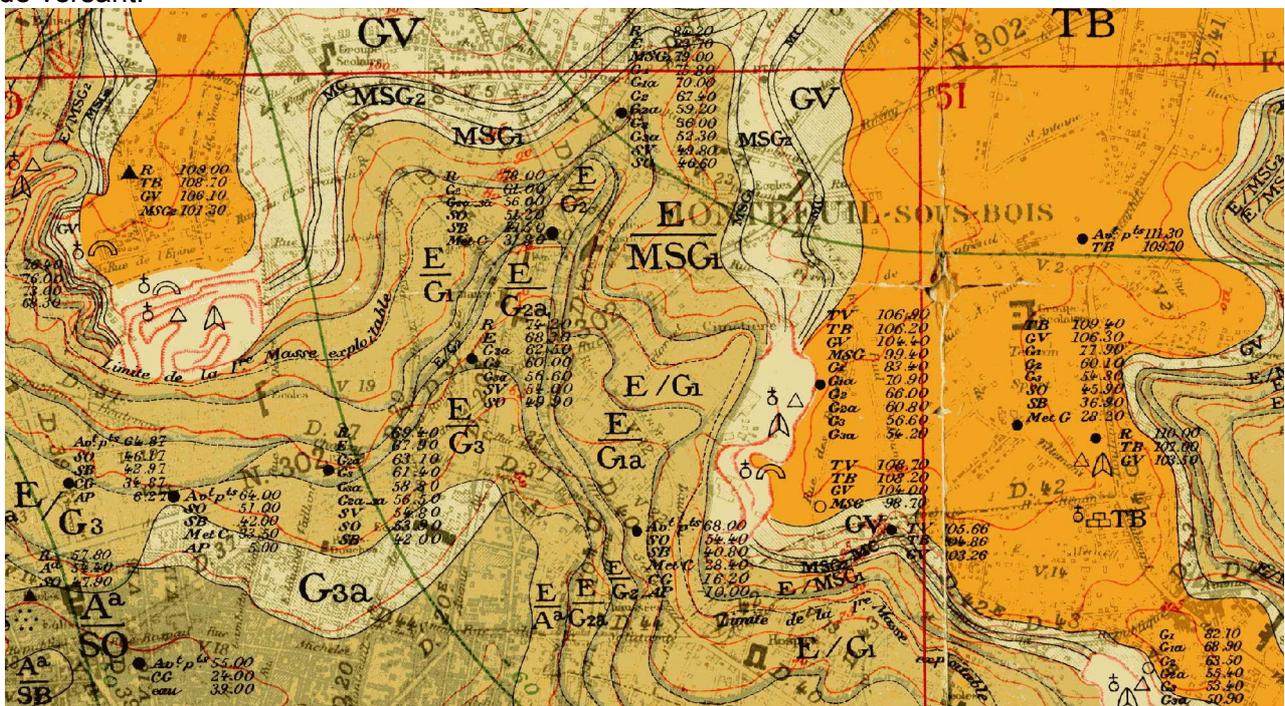
Dans le cadre de l'élaboration du PPR mouvements de terrain sur la commune de Montreuil, l'expertise confiée à l'Inspection générale des carrières de la Ville de Paris (IGC) par la direction départementale de l'Équipement porte sur l'identification des aléas carrières souterraines ou à ciel ouvert et dissolutions de gypse, et leur cartographie à l'échelle du 1/5 000^{ème}.

Cette partie de la note de présentation est consacrée à la présentation de la méthodologie de l'élaboration de l'étude d'aléas réalisée par l'IGC ainsi qu'à la caractérisation des aléas liés aux anciennes carrières et aux dissolutions de gypse sur la commune de Montreuil.

2.1 PRÉSENTATION DU CONTEXTE GÉOLOGIQUE

2.1.1 Géologie de Montreuil appliquée aux carrières et aux dissolutions de gypse

La commune de Montreuil s'inscrit topographiquement et géologiquement dans une butte-témoin, qui s'étire depuis Belleville (Paris 19^{ème} et 20^{ème} arrondissements) à l'Ouest jusqu'à Vaujours à l'Est, avec une courbure de l'axe tectonique principal. Cette butte-témoin, composée essentiellement de terrains appartenant au Ludien, est chapeautée par les travertins de Brie et des argiles vertes, voire des glaises, qui sont très plastiques et qui ont une tendance à fluer en bordure de versant.



R : Remblais ; A : Alluvions ; E : Formations de pente ; TB : Travertins de Brie ; GV : Glaises vertes ; MSG : Marnes supra-gypseuses ; G(1) : Masse du gypse (1^{ère} masse) ; SO : Marno calcaire de Saint Ouen ; SB : Sables de Beauchamp ; M et C : Marnes et caillasses du Lutétien

Extrait de la carte géologique au 1/5 000^{ème} – quart Nord Est de Paris
Source : IGC

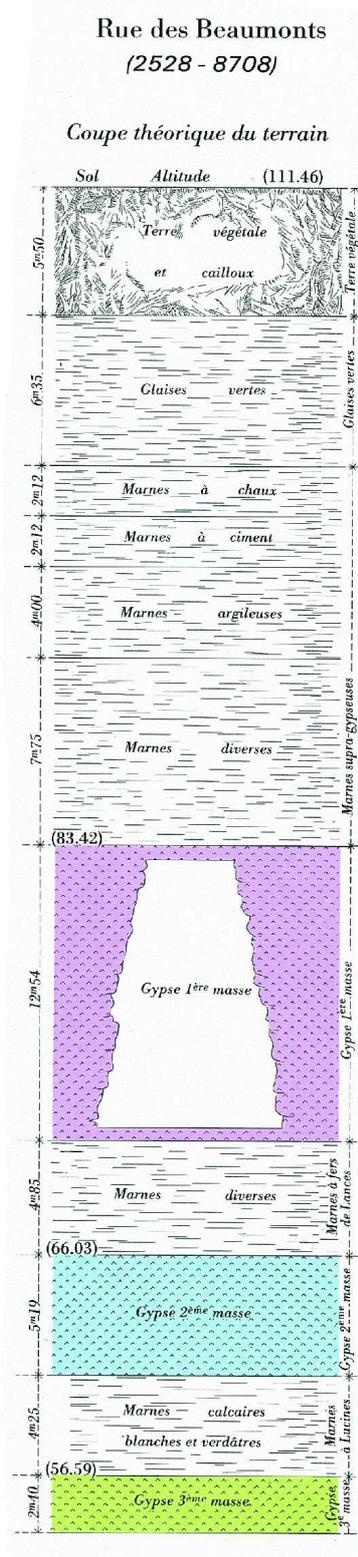
A Montreuil, les horizons exploités se situent, pour le gypse, sur le flanc Sud de la butte-témoin laissée par l'érosion périglaciaire, et, pour les travertins de Brie, sur le plateau. Les exploitations de glaise vertes sont le plus souvent associées à celles de gypse. Il existe cependant des sablières alluvionnaires dans la partie Sud Ouest de Montreuil.

La série ludienne repose sur un ensemble marinésien composé de marno calcaires (de Saint-Ouen) et de sables (de Beauchamp) recouvrant des marnes et caillasses lutétiennes. Ces différents horizons se retrouvent dans la partie Sud Ouest de la commune. Ces formations sous-jacentes au Ludien peuvent contenir des poches de gypse dit « antéludien », le plus souvent contenu dans le Lutétien, qui peuvent se dissoudre lors des circulations d'eau et des mouvements des nappes souterraines.

Toutefois, dans l'état actuel des connaissances géologiques, de tels éléments n'ont pas été observés dans les marnes et caillasses du Lutétien, sur la commune de Montreuil.

Le Ludien et le sommet du Marinésien sont relativement homogènes dans les dépôts. Ils se décomposent en quatre assises ou masses de gypse et cinq couches de marnes à entrefilets gypseux fréquents : les marnes inférieures, les trois marnes intercalaires et les marnes supérieures. Ces horizons ont environ 35 millions d'années et ont au total une puissance avoisinant 50 mètres.

Les trois horizons de gypse ludien ont été entaillés : la haute masse, les deuxième et troisième masses. Ces bancs de gypse sont séparés par un ensemble marneux de 3 à 5 mètres d'épaisseur et surmontent les Marnes Infra-gypseuses, dans lesquelles s'intercalent des bancs de gypse moins épais, inexploitable dans des conditions techniques et économiques satisfaisantes (4^{ème} masse de gypse).



**Coupe de terrain, avenue Jean Moulin
(atlas des carrières)
Source : IGC**

Les qualités du gypse du bassin parisien ont incité les exploitants à extraire le gypse ludien dès qu'il était sain. La hauteur des exploitations n'excède pas 17 mètres en cumulé sur les 3 étages (secteur des Beaumonts).

L'exploitation du gypse ludien se répartit en deux grands ensembles encadrant le centre ville. Au niveau de ces deux sites principaux de carrières répertoriés, les effets de la sédimentologie et de la tectonique sont négligeables pour les épaisseurs des dépôts et leur altitude relative.

Des marnes supra-gypseuses recouvrent le haut des plateaux. Se situent en tête les marnes dites « de Pantin » qui sont des marnes calcareuses blanchâtres, puis les marnes dites « d'Argenteuil » bleutées et plastiques qui peuvent renfermer quelques petits niveaux de gypse en base. Cet ensemble est surmonté par des argiles vertes et les travertins de Brie qui sont le siège de petites exploitations.

Tous ces terrains tertiaires ont été érodés et remaniés durant le Quaternaire pour donner un versant d'une dénivelée supérieure à 60 mètres entre les plateaux du sommet, vers une altitude de 116 m (NGF), et la plaine alluviale (Haute terrasse de la Seine) à l'extrémité Sud Ouest de Montreuil à une altitude voisine de 52 m (NGF).

Sur le versant principal, sur lequel est situé le centre ville de la commune, se rencontrent des formations de pente, constituées par tous les matériaux sus-jacents (sables, travertins, marnes, argiles et quelques lentilles de gypse), qui se sont mis en place pendant le début du Quaternaire. Les matériaux gypseux du Ludien semblent avoir été plus ou moins dissous sous les formations de pente et pseudo-morphosés en calcite.

2.1.2 Conséquence de l'hydrologie sur les carrières

Les eaux naturelles constituent un facteur déclencheur ou aggravant des risques. Il est donc essentiel de définir en amont de l'étude, les différentes nappes en présence. Leur rôle spécifique, tant pour les risques liés aux carrières qu'aux dissolutions de gypse et aux mouvements de terrain, sera défini dans chaque partie.

Deux nappes principales existent à Montreuil :

- la nappe phréatique, en partie basse de Montreuil, qui se situe dans les marno-calcaires de Saint-Ouen et qui correspond à la nappe générale de cette région de l'Ile-de-France ;
- une nappe perchée, contenue par les aquifères sus-jacents aux argiles vertes, essentiellement dans les travertins de Brie.

La nappe perchée est alimentée par la pluie efficace du plateau. A l'origine l'eau s'écoulait sur les bordures des plateaux par l'intermédiaire de sources qui ont donné naissance à des thalwegs (dont celui du ru de Gobetue). Ces sources ayant disparu, ces eaux se perdent dans les formations superficielles et sont probablement à l'origine de la séparation des exploitations ouest et centre. Elles doivent rejoindre la nappe phréatique en pied de butte. Ces circulations d'eau (nappe de versant), probablement chargées en ions calcium, sont à l'origine de la pseudo-morphose du gypse en calcite, qui a affecté tous les niveaux ludiens, plus particulièrement dans le centre ville.

Toutes ces eaux des terrains de recouvrement se perdent parfois dans les carrières en raison d'accidents de terrains (travaux, fontis atteignant la surface, fissurations, diaclases ouvertes, décapage des argiles et marnes les protégeant). Le gypse est un matériau soluble dans une eau non saturée en sulfates. Mais dès lors que l'eau est saturée, le gypse se comporte comme un milieu imperméable.

Les eaux superficielles qui s'écoulent sur les versants de la vallée sont un facteur déterminant pour l'implantation des carrières et pour leur stabilité. Ainsi sur Montreuil, les carrières de gypse se situent de chaque côté du thalweg principal, le centre ville présentant des problèmes de dissolution et de pseudo-morphose du gypse ou de stabilité (formations de pente épaisses).

2.1.3 Exploitations des matériaux et dissolutions

Les cavités susceptibles d'entraîner des désordres en surface, sur le territoire de Montreuil, concernent essentiellement le gypse et le travertin de Brie, qu'il s'agisse de cavités anthropiques ou naturelles (éventuels karsts).

D'autres couches géologiques, telles les sables et graviers des alluvions anciennes ou les glaises des Marnes Vertes, ont été extraites à ciel ouvert. Les marnes Supra-gypseuses ont pu également faire l'objet d'extraction à ciel ouvert, mais elles sont associées aux exploitations d'argiles vertes.

2.1.3.1 Matériaux exploités et taux de défruitement

L'activité de la majorité des carrières a cessé dans la seconde moitié du 19^e siècle, bien que certaines exploitations aient pu être reprises plus tard. Les modes d'exploitation se sont succédés et ont varié dans le temps d'un lieu à l'autre, mais les principes généraux sont restés semblables.

Différentes méthodes d'exploitation coexistent sur une même carrière en fonction de leur rentabilité et de leur répartition. La méthode la plus simple quand le matériau affleure directement ou quand le recouvrement le permet (faible profondeur), est l'exploitation à ciel ouvert. C'est la méthode la plus ancienne. La carrière est directement à flanc de coteau.

✓ Pour les **argiles vertes**, il n'existe apparemment que ce type de carrière, associées aux exploitations de gypse.

Les hauteurs d'exploitation étaient très variables. Les vides créés étaient le plus souvent comblés à l'aide de matériaux divers (déblais, terres stériles du recouvrement... mais aussi avec des gravats, bois, briques et même des ordures ménagères), matériaux ayant des qualités mécaniques variables et souvent très réduites. Les épaisseurs de remblais varient de quelques mètres à 38 mètres. Cette épaisseur est particulièrement difficile à estimer quand plusieurs carrières se superposent et la plus profonde, souvent souterraine à l'origine, s'est effondrée et a été remblayée, depuis la surface, par des remblais de mauvaise qualité.

✓ Pour le **gypse ludien**, cette méthode était utilisée en association avec d'autres exploitations (glaises vertes et/ou marnes supra-gypseuses) ou seules, et s'arrêtait quand le recouvrement devenait trop important.

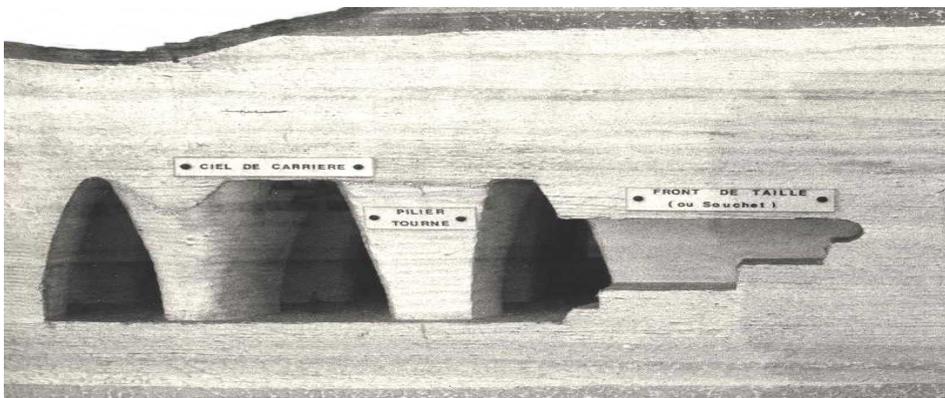
Maquette de l'IGC montrant une carrière de gypse ludien à ciel ouvert
Source : IGC



✓ Les **sablières** ont été exploitées exclusivement à ciel ouvert, hors nappe, sur la commune de Montreuil. Elles correspondent à des carrières localisées dans le Sud Ouest de la commune où les sables et graviers alluvionnaires affleurent.

Le recouvrement augmentant, les carriers ont extrait le gypse en souterrain sur 3 niveaux. La haute masse a été exploitée intensément sur des hauteurs pouvant atteindre 11 mètres à Montreuil. Les deuxième et troisième masses, moins puissantes, ont été également exploitées. Les travertins de Brie furent extraits uniquement en souterrain.

- méthode dite « des piliers tournés » : exploitation souterraine de la pierre en laissant régulièrement du matériau en place (ou étaux de masse qui constituent ainsi des piliers naturels). Cette méthode permet d'obtenir des salles d'exploitation assez hautes et de ne pas remblayer la carrière derrière soi.



Extrait de la maquette de l'Inspection générale des carrières montrant une carrière souterraine exploitée par la méthode des piliers tournés dans le gypse ludien
Source : IGC

- méthode par « hagues et bourrages » : exploitation souterraine de la pierre sur la totalité de l'espace, en laissant derrière soi des remblais ou déchets de l'extraction maintenus par des murs de pierres sèches, si possible jusqu'au toit de la salle d'extraction, et en réalisant quelques piliers en pierres sèches (dits « cales à bras ») pour maintenir le toit de la carrière, le temps de l'exploitation. Cette méthode nécessite la réalisation de salles moins hautes mais qui peuvent être superposées. Seules quelques galeries subsistent, essentiellement en front de taille, le reste est comblé. Toutefois, il peut rester quelques galeries oubliées non comblées. Avec le temps les remblais se tassent. Cette méthode n'a pas été appliquée à Montreuil.

- méthode des galeries en rameaux : exploitation souterraine à partir d'un puits, de faible profondeur, par un réseau de galeries étroites, qui se recourent ou pas. Elles laissent un étai de masse important. Ces galeries artisanales, souvent clandestines, sont réalisées sans plans. L'aspect irrégulier et anarchique de ces exploitations les rendent difficiles à détecter.

L'examen des plans et des archives a révélé que l'exploitation du gypse a été conduite exclusivement par la méthode dite des piliers tournés (ou piliers abandonnés), avec un taux de défrètement pouvant atteindre 70 % localement. Le taux de défrètement représente le rapport entre la surface des vides et la surface totale de l'exploitation (en considérant les surfaces à 1 mètre du pied de carrière).

En vue de réduire la portée du ciel entre deux piliers, précaution rendue nécessaire par la faible résistance à la traction et l'altérabilité du gypse, les carriers ont donné aux galeries une structure ogivale (haute masse) ou trapézoïdale (2^{ème} et 3^{ème} masses), large à la base et étroite au sommet.

Les piliers peuvent présenter maintenant des signes visibles d'altération tels que l'écaillage, la fragmentation, la fissuration, voire la ruine.

L'épaisseur du banc séparatif peut également être faible par rapport à sa résistance. Dans ce cas, il y a un risque de rupture du banc entre les différents niveaux d'exploitation. De même, le poinçonnement du mur (sol de la carrière) par les piliers est à craindre quand le banc de gypse laissé en base est trop mince.

Les terrains situés au-dessus des masses exploitées sont de nature marneuse à argileuse, et ont été le siège de décapage. Ainsi la protection naturelle contre les venues d'eau a été retirée.

En fin d'exploitation, la carrière était abandonnée le plus souvent sans remblayage. Afin d'éviter les accidents graves liés à la présence de ces vides souterrains importants, certaines de ces carrières ont été localement consolidées par des voûtes en maçonnerie ou en béton, à proximité des versants, ou ont subi un remblayage très partiel, laissant subsister des vides résiduels importants.

Certaines parties de ces carrières se sont effondrées. Ce phénomène laisse subsister des vides entre les blocs de roche fracturés et éboulés et ne conduit pas une stabilité absolue de la surface du sol. Les anciennes exploitations de gypse, effondrées ou non, constituent toujours une grave menace pour la stabilité du sol, d'autant que les vides sont inaccessibles et ne peuvent donc pas être surveillés. La surface devient très chahutée et les vides arrivés à jour sont souvent remblayés sommairement avec des matériaux de mauvaise qualité. Dans le cas de Montreuil, certains secteurs ont été partiellement envahis par des marnes et argiles provenant des terrains supérieurs, ou ont été repris à ciel ouvert par les carriers.

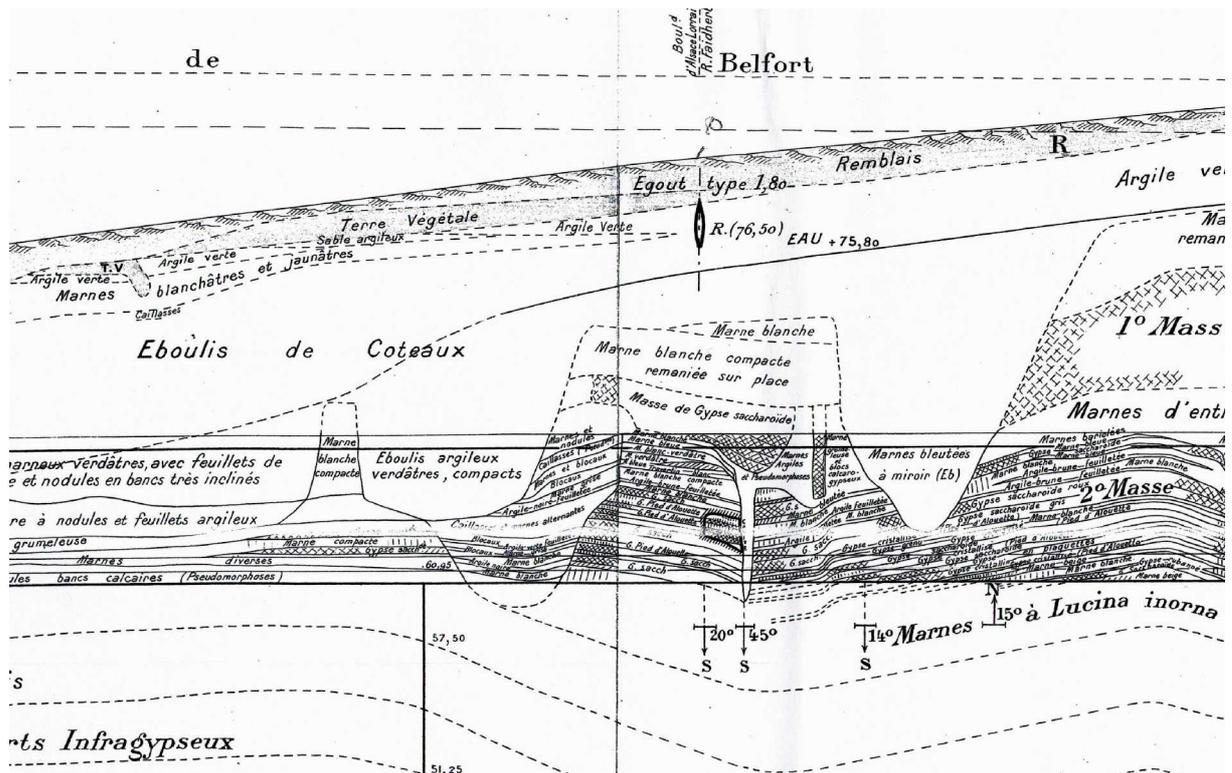
Les exploitations de travertins de Brie, en particulier leur géométrie, sont mal connues et souvent repérées lors d'incidents.

2.1.3.2 Dissolutions du gypse

Gypse du Ludien

C'est dans cet horizon géologique que se trouvent les différentes masses de gypse exploitées à Montreuil et dans la région. Sur la commune de Montreuil, les vides existants dans cette formation sont essentiellement dus aux carrières de gypse. Toutefois, certains vides dans le gypse ludien peuvent résulter de phénomènes de dissolution donnant naissance par endroits à des petits réseaux karstiques, dont le vieillissement est similaire à ceux des galeries de carrières. Ces phénomènes sont dus à la fracturation de cet horizon et/ou aux écoulements d'eau en base de versants dans les 3^{ème} et 4^{ème} masses de gypse.

Les sondages, réalisés dans l'intervalle entre les 2 grands sites de carrières souterraines et à ciel ouvert, montrent que ces formations ludiennes ont été le siège de pseudo-morphoses du gypse, en calcite notamment, associée à des argiles vertes magnésiennes. Les restes des formations gypseuses forment des lentilles. Apparemment les bancs continus ont disparu.



Extrait de la coupe RATP du prolongement de la ligne 9 jusqu'à Mairie de Montreuil, montrant les variations d'épaisseur de gypse ludien subsistant dans le sol, sous les éboulis

Toutefois, les épaisseurs d'origine de ces formations peuvent être très importantes et les lentilles laissées en place épaisses.

En fonction de l'épaisseur résiduelle de gypse dans les lentilles et donc de la taille possible du vide engendré, les désordres, rencontrés au-dessus de ces lentilles, s'apparentent à ceux rencontrés au-dessus des exploitations : fontis, affaissements, décompressions des terrains de recouvrement.

Gypse antéludien (Marinésien et Lutétien)

En l'état des connaissances géologiques sur le sud de Montreuil, il ne semble pas que les marnes et caillasses du Lutétien soient assez épaisses pour contenir du gypse. Sur les coupes de sondages, réalisés dans des communes voisines, des petits niveaux gypseux sont repérables dans les marnes et caillasses. Toutefois leur épaisseur, même en cumulé, n'est pas suffisante pour créer des désordres dans les niveaux géologiques supérieurs.

De plus, les quelques sondages connus montrent des traces de pseudo-morphoses de gypse dans les marno-calcaires de Saint-Ouen.

Le risque de dissolution des gypses antéludiens n'est donc apparemment pas à craindre sur la commune de Montreuil.

2.2 DESCRIPTION DES DÉSORDRES

Les désordres de surface sont consécutifs à la présence de vides dans les bancs de gypse ou de travertins et à l'effondrement des terrains sus-jacents ou des remblais.

Ces anomalies peuvent être de deux origines :

- **anthropiques**, l'homme ayant exploité les bancs de travertin ou de gypse en carrières souterraines, ou à ciel ouvert (remblais) ;
- **naturelles**, dues à la dissolution du gypse par l'eau ou aux phénomènes de versant.

Les vides peuvent remonter vers la surface après affaissement des terrains qui les recouvrent et provoquer alors, selon la hauteur du recouvrement, soit une cuvette appelée *affaissement* soit une cavité appelée "*fontis*". Les affaissements et les fontis sont des phénomènes localisés, d'une forme circulaire et de diamètre plus ou moins grand.

Avec les phénomènes de versant, on peut rencontrer des effondrements localisés, parallèles entre eux et perpendiculaires à la ligne de plus grande pente, plus connus sous le vocable d'éboulements, bien que le terme soit impropre puisqu'il n'y a pas de basculement de blocs. En revanche, ces éboulements existent bien en limite de falaises au niveau des entrées en cavage.

Lorsque l'effondrement est brutal et concerne une grande partie de la carrière, on parle d'un *effondrement généralisé* de carrière souterraine, par rupture des piliers de toute une zone.

Des désordres peuvent être constatés au-dessus des exploitations connues de gypse. Ce sont soit :

- des fontis d'importance et de diamètre variables en fonction des caractéristiques de la carrière (nombre d'étages, superposition correcte ou non, hauteurs des galeries, discontinuités, épaisseur et nature des terrains de recouvrement) ;
- des zones d'affaissements ou de tassements différentiels ;
- des zones d'effondrements importants pouvant être assimilés à des effondrements généralisés.

2.2.1 Les différents types de désordres

Les aléas de mouvements de terrain liés aux exploitations souterraines et à ciel ouvert, ou aux dissolutions de gypse, sont explicités ci-après. Les aléas « carrière » décrits pour les carrières à ciel ouvert ne concernent que celles qui ont été remblayées par les carriers avec des matériaux d'origine diverse et des terrains remaniés laissés sur place, plus particulièrement des stériles contenant encore du gypse.

2.2.1.1 Les affaissements

Les affaissements sont des désordres ponctuels, visibles en surface, se présentant sous forme de cuvettes et consécutifs à la lente fermeture de vides profonds. Ils se forment par ruptures successives des différents horizons formant le recouvrement du vide initiateur.

Ils résultent de trois phénomènes de remontée de décompression par :

- Un fontis d'origine profonde qui s'est auto colmaté mais qui a décomprimé tous les terrains sus-jacents. Il reste toujours des petits vides résiduels en profondeur qui continuent à évoluer très lentement ;
- Un fontis d'origine moins profonde mais qui survient dans une zone partiellement remblayée et qui s'auto colmate de la même façon que dans le cas du phénomène précédent ;
- Les horizons sus-jacents au vide initial ne sont pas suffisamment résistants (bancs restant en toit insuffisamment épais) pour que le vide puisse s'agrandir sous la dalle de toit, par dissolution ou par tassement de remblais. On dit que l'effet de voûte est impossible. Les terrains supérieurs s'affaissent progressivement sans qu'un vide franc ne remonte et n'apparaisse à la surface. Les terrains continuent à se décompresser tant que le phénomène initiateur n'a pas cessé.

Leur importance varie entre la simple "flache" de quelques centimètres à quelques mètres. Ils sont peu profonds et ne présentent pas un danger immédiat de rupture brutale.

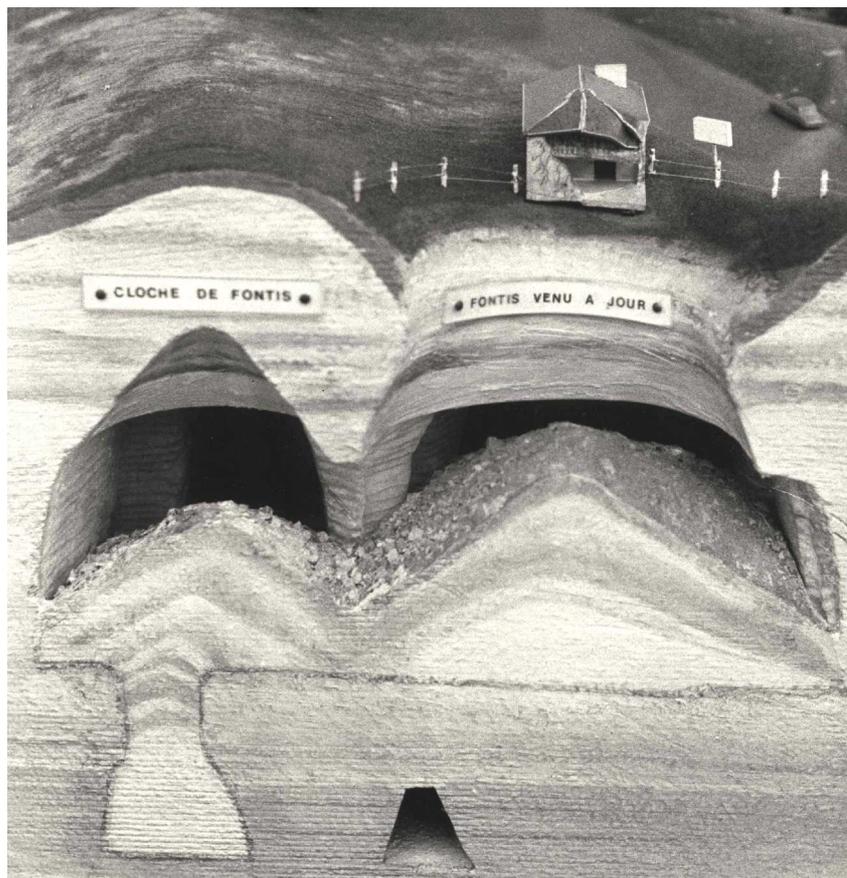
Ils peuvent se généraliser à une grande partie de l'exploitation. Mais comme les tassements sont lents, leurs effets ne se remarquent que par la décompression des terrains sus-jacents aux zones sous minées. Toutefois, à la faveur d'un incident, le tassement peut être localement accentué, en ce cas un affaissement apparaît.

☞ Sur les bâtiments, ces affaissements créent des tassements différentiels sur les fondations qui se traduisent par des fissures plus ou moins importantes et plus ou moins ouvertes, parfois traversantes, allant de la dégradation du ravalement à la ruine des murs porteurs, en passant par le blocage des portes et fenêtres.

Ils peuvent provoquer par contre des altérations ou des ruptures de canalisations (eaux, égouts, gaz...). Les fuites de ces canalisations peuvent avoir des conséquences non négligeables sur l'évolution à court terme du site.

2.2.1.2 Les fontis

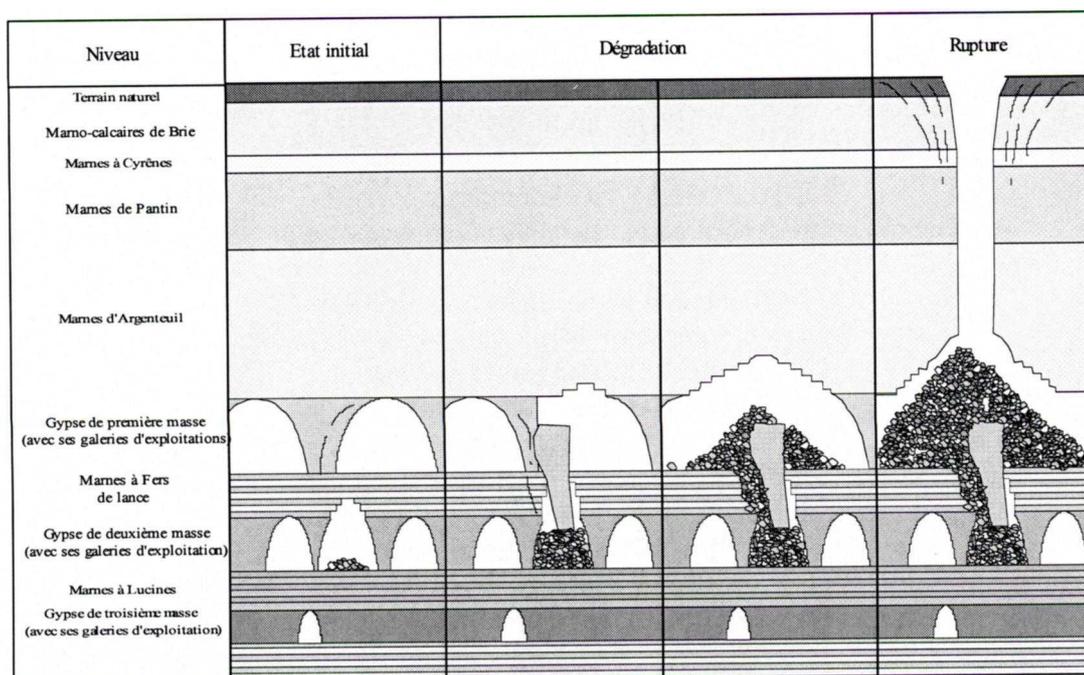
Les fontis sont des effondrements ponctuels initiés par la rupture progressive des premiers bancs du toit par flexion ou par cisaillement sur les appuis, cela en raison d'une largeur de galerie excessive eu égard à la résistance des dalles rocheuses en toit, qui sont le plus souvent fracturées. Le processus se développe alors verticalement et provoque la formation d'une "cloche de fontis".



Extrait de la maquette de l'Inspection générale des carrières, montrant 2 étapes du mécanisme d'un fontis sur une carrière souterraine de gypse
Source : IGC

Ce risque est présent sur la commune de Montreuil plus particulièrement pour les intersections de galeries dans le gypse, exploité par la méthode des piliers tournés, là où les contraintes de traction dans le ciel de carrière sont maximales. Avec le vieillissement de l'exploitation, les piliers peuvent présenter maintenant des signes visibles d'altération tels que l'écaillage, la fragmentation, la fissuration, voire la ruine.

L'épaisseur du banc séparatif entre deux étages peut également être faible. Dans ce cas, il y a un risque de rupture du banc entre les différents niveaux d'exploitation. De même, le poinçonnement du plancher (sol de la carrière) par les piliers est à craindre quand le banc du matériau résiduel en base est trop mince. En ce cas le fontis peut intéresser les 2 étages de carrière et être plus important en surface.



Mécanisme de venue à jour d'un fontis dans le cas d'une superposition d'étage
Source : IGC

La superposition de plusieurs niveaux accélère l'apparition des fontis et accentue leur ampleur. Le décapage des couches argileuses sus-jacentes réduit la protection naturelle des niveaux gypseux contre l'eau.

Les terrains situés au-dessus des matériaux exploités sont de nature marneuse à argileuse, avec des intercalaires gypsifères. Le recouvrement intervient dans le processus de dégradation tant par son épaisseur (poids des terres) que par sa nature (bancs plus ou moins durs faisant ou non effet de voûte). Il induit des contraintes verticales (ou obliques en bordure de versant) dans le toit et les piliers, et influe sur la rapidité de la venue à jour des fontis. Plus les vides résiduels sont importants par rapport à la hauteur de recouvrement plus la probabilité d'apparition de fontis est forte. Plus les tassements différentiels sont importants en bordure de front de taille, plus le ciel de carrière aura tendance à céder du fait de l'augmentation des contraintes de cisaillement.

☞ Sur les bâtiments, l'apparition d'un fontis se traduit par la perte de sol de fondation. Si le bâtiment n'a pas de structure rigide des fondations, les murs porteurs cassent entraînant la ruine de tout ou partie du bâti, en fonction de la taille du fontis et du point de survenance du phénomène. Les canalisations peuvent se rompre sur le moment ou à court terme par flexion, dans le vide, après l'évènement.

2.2.1.3 Les effondrements généralisés

Les effondrements généralisés sont susceptibles d'affecter de façon quasi spontanée une superficie de plusieurs hectares. Ils procèdent d'un mécanisme d'ensemble qui concerne la totalité ou une grande partie du volume affecté par l'exploitation. Celle-ci présente une extension horizontale minimale (L) supérieure à la hauteur (H) du recouvrement, ce qui du point de vue de la stabilité correspond à une géométrie dite critique ou supercritique avec un rapport $L/H > 1$. Ce type de ruine est lié à l'enfoncement et à la rupture des piliers, qui s'observe au soufflage du mur (enfoncement par poinçonnement des piliers dans un niveau sous-jacent de nature marneuse lorsque la dalle de gypse au mur est d'épaisseur insuffisante).

L'apparition de ce phénomène est caractérisée d'une part par une bonne résistance à la traction du banc formant le toit, propriété que ne possèdent ni le gypse ni les travertins de Brie sur une grande surface, et d'autre part par une exploitation intensive en pied de carrière laissant une couche insuffisamment épaisse en pied pour résister à la surcharge des piliers en place.

☞ Le bâti est totalement détruit par la violence du phénomène.

2.2.1.4 Les zones de karst

Le gypse est soluble à 2 g/l dans de l'eau pure. Cette solubilité augmente dans une eau chargée. Des réseaux karstiques plus ou moins importants peuvent se développer, en fonction de la dureté des bancs sus-jacents. Toutefois la dissolution du gypse nécessite des circulations d'eau non saturée en sulfate assez importantes.

Lorsque la dissolution s'apparente à un début de lessivage, comme c'est le cas à Montreuil, s'observent alors des phénomènes intermédiaires entre la karstification et la pseudo-morphose des éléments gypseux, de forme saccharoïde pour le Ludien, à partir des apports calciques et siliceux des eaux. Dans les horizons affectés se rencontrent du gypse en lentilles plus ou moins importantes et des éléments bréchiques, essentiellement siliceux et calcitiques avec des argiles magnésiennes, pour une épaisseur « normale » de l'horizon. Les éléments gypseux en quantité et épaisseurs non négligeables qui peuvent encore s'y trouver, sont très sensibles aux eaux parasites.

A Montreuil, ce phénomène concerne toute la partie centrale de la ville, entre les deux grandes carrières de gypse. Il n'existe pas de karst à proprement parler dans ce cas. Cependant, les différentes masses de gypse ont été protégées de ce phénomène dans les environs des carrières. On peut donc rencontrer dans la 3^{ème} masse de gypse ludien et la 4^{ème} masse marinésienne de petits réseaux karstiques, plus particulièrement au Sud du parc des Beaumonts.

Les phénomènes de dissolution sont visibles à l'échelle humaine pour le gypse. L'évolution mécanique due à la déstabilisation des terrains, sus-jacents au vide, peut être plus rapide que la dissolution du gypse.

Les zones où des vides ont été créés par dissolution sont soumises aux deux premiers phénomènes : le fontis et l'affaissement en fonction de la résistance mécanique à la traction de l'horizon géologique au-dessus du vide qui se forme.

2.2.2 Facteurs aggravant le processus de dégradation des carrières

De quelque nature qu'ils puissent être, les processus de dégradation des carrières qui engendrent des situations accidentelles, résultent souvent d'une combinaison entre une ou plusieurs configurations défavorables susceptibles de modifier les conditions d'équilibre du milieu et d'accélérer la rupture. Ces configurations sont généralement dues au contexte géologique, hydrogéologique du site mais aussi géographique et humain :

- Les zones où des éboulements se sont produits, présentent de fortes probabilités d'infiltrations d'eau ;
- Les zones où des exploitations à ciel ouvert ont été exploitées puis remblayées avec des matériaux perméables ou gypseux, présentent de fortes probabilités d'infiltrations d'eau ;
- La présence d'eau peut avoir une grande influence sur les propriétés mécaniques des matériaux exploités et des terrains de recouvrement et donc sur la stabilité des ouvrages ;
- Les circulations d'eau peuvent également entraîner les particules fines argileuses ou silteuses qu'elles rencontrent dans le sol et provoquer ainsi l'apparition de décompressions dans les horizons traversés ;
- Dans les zones où la couverture, en place, est importante, les venues d'eau ont peu d'influence sur la dégradation de la carrière, sauf autour des fontis et des puits. Il en est de même pour la dissolution, autour des fontis ;
- Le modelé du site (déclivité, talus non soutenus, falaises laissées à nu dans les terrains) a des conséquences directes sur la stabilité des carrières, plus particulièrement au niveau des entrées en cavage. Les contraintes dans le sol, dues aux terrains de recouvrement deviennent obliques et les piliers de carrière ne sont pas toujours dimensionnés pour les reprendre. Au niveau des falaises cachées par les remblais, les infiltrations d'eau accentuent l'ouverture des fissures ou diaclases dans les terrains de couverture et le toit de la carrière ;
- L'absence d'assainissement dans certaines zones, les fuites de réseau, les cuves non étanches, même anciennes, sont des facteurs aggravants non négligeables puisqu'elles représentent autant de sources d'eau non saturée en sulfates dans le sol. Ces venues d'eau ont une grande importance sur l'intensité de la dissolution du gypse. Ainsi, les dissolutions sont d'autant plus fortes que l'eau peut se renouveler rapidement par rapport à de l'eau stagnante dans le sol qui, une fois saturée, ne dissout plus le matériau environnant ;
- Dans les zones d'anciens thalwegs, la dissolution est, en premier lieu, fossile, due aux cycles de glaciations – dégel du début du Quaternaire et à la présence d'un ru pendant un certain temps, ou active par le drain que le thalweg a créé dans le sol ;
- Enfin un fort couvert végétal, en particulier quand il présente des essences à racines abondantes et profondes. Ces dernières passent par les fissures en toit de carrière et se développent en pied. En grossissant elles accentuent les venues d'eau en carrière et éclatent le ciel.

2.3 PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE D'ALÉA RÉALISÉE PAR L'INSPECTION GÉNÉRALE DES CARRIÈRES DE LA VILLE DE PARIS (IGC)

2.3.1 Méthodologie

L'Inspection générale des carrières (IGC) a mené cette étude à partir des différentes cartes disponibles :

- la carte géologique au 1/20 000^{ème} de l'Inspection générale des carrières, quart Nord-Est ;
- la carte géologique minute au 1/5 000^{ème} existant à l'IGC et comportant des points de sondages avec des coupes résumées ;

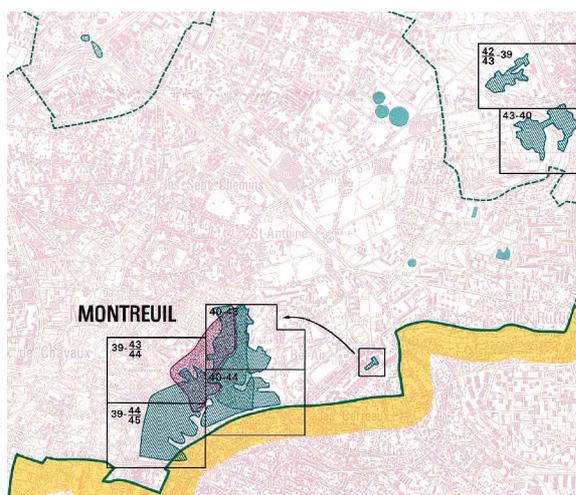
- les cartes des carrières de l'atlas au 1/1 000^{ème} réalisées initialement à partir des plans fournis par les carriers (délimitations en pointillés) et dessinées à partir des relevés topographiques directement effectués par des agents de l'IGC (délimitations en traits pleins). Ces cartes de carrières sont tenues à jour à partir des déclarations d'incidents et des récolements de travaux (voirie, permis de construire, grands travaux).

Il convient de noter que certains documents consultés sont anciens et peuvent ainsi être incomplets.

De concert avec l'IGC, la direction départementale de l'Équipement (DDE) a mené une enquête auprès des divers organismes susceptibles de connaître ou d'archiver des informations géologiques et géotechniques.

La Mairie de Montreuil a participé également à la recherche de documentation en permettant à l'Inspection générale des carrières d'accéder à ses archives.

Dans le cadre des conventions passées entre le conseil général de la Seine-Saint-Denis et la commune de Montreuil, avec la Ville de Paris, l'Inspection générale des carrières peut procéder à des visites de contrôle sous le domaine public. Toutefois, les carrières de Montreuil ne sont plus aujourd'hui accessibles. Quelques inspections de surface ponctuelles sont effectuées lors d'incidents, à la demande de la ville ou des particuliers.



Extrait de carte d'assemblage sur Montreuil
Source : IGC

Le présent document expose l'ensemble des données géologiques, géographiques et historiques liées à l'existence des carrières, qui ont été recueillies sur le territoire de la commune de Montreuil. L'analyse de ces données a permis de mettre en évidence les critères d'existence des cavités, tant liées aux carrières souterraines qu'aux dissolutions de gypse, ainsi que les facteurs entraînant leur dégradation ou leur remontée plus ou moins rapide, sous forme de fontis, vers la surface.

La cartographie des aléas comprend un report au 1/5 000^{ème} des aléas dus aux cavités connues à la date de la publication de ce plan. Cette cartographie est réalisée à partir de l'étude des données disponibles à ce jour : géologie, hydrogéologie, diagraphies, coupes de sondages et visites quand elles sont possibles. L'analyse critique de ces données permet de définir les niveaux d'aléas et d'établir la carte correspondante.

On déplore une absence d'informations pour certaines parties de carrières dont l'existence est fortement présumée. En ce cas, il n'existe pas de cartes de carrières permettant de les localiser et de pouvoir informer le public. De la même manière, les limites d'exploitation des carrières à ciel ouvert ne sont pas toujours bien définies.

2.3.2 Inventaire des carrières à ciel ouvert connues à Montreuil

2.3.2.1 Les sablières

Les alluvions anciennes ont été exploitées à Montreuil, à la fin du XIX^{ème} siècle, dans la partie Sud-Ouest de la commune. Elles correspondent à une Haute Terrasse. Ces alluvions anciennes sont constituées de sables, graviers et cailloux, propres, très utilisés dans les agrégats pour mortiers et bétons. La profondeur des sablières n'excède pas 6 m et les banquettes devaient faire moins de 3 m de haut.

Elles sont mal connues et grossièrement répertoriées dans le plan d'assemblage au 1/5 000^{ème} de l'atlas des carrières de l'IGC. Les problèmes rencontrés proviennent de la possibilité de tassements différentiels entre la zone exploitée, et remblayée, et la zone saine voisine.

Parfois quand la différence de qualité des matériaux est trop importante entre les remblais et le sol en place, de l'eau peut être piégée dans les remblais et provoquer des venues d'eau accidentelles dans les sous-sols profonds.

2.3.2.2 Les carrières de glaises vertes

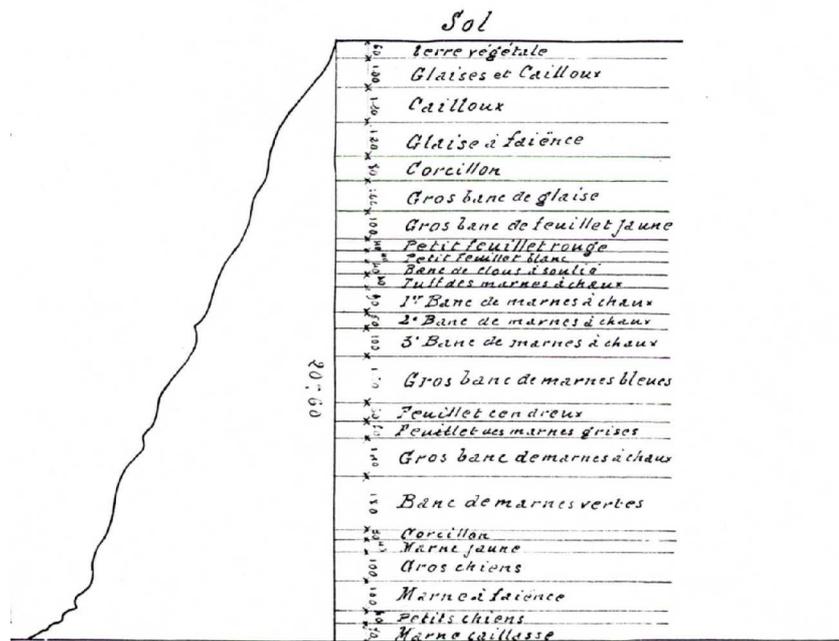
A Montreuil, les argiles vertes (glaises vertes) ont été fortement exploitées, exclusivement à ciel ouvert, en association aux carrières de gypse ludien.



**Carrière d'Argile Verte à ciel ouvert, commune de Montreuil
Source : IGC**

D'après la documentation de l'IGC, les marnes supra-gypseuses ont été l'objet de décapages de surface, mais leur localisation n'est pas connue. Ces carrières d'argiles vertes ont existé sur les 2 principaux sites d'exploitation du gypse, affaiblissant ainsi la couverture imperméable assurant la stabilité des carrières souterraines de gypse sous-jacentes.

L'exploitation en elle-même fait de 4,5 à 5 m de hauteur. Mais le décapage du recouvrement et l'exploitation des terrains sous-jacents entraînent des épaisseurs de remblaiement beaucoup plus importantes, pouvant atteindre 38 mètres par endroit quand la base du gypse de Haute Masse est atteinte.



*Coupe d'affleurement à Montreuil-sous-Bois
Le 2 novembre 1893
Dollot*

**Coupe de terrain réalisée par M. Dollot, lors de sa demande d'exploitation, sur le secteur des Guilands
Source : archives de la ville de Montreuil**

La carrière de l'Ouest correspond aux premiers terrains du lieu dit « la Capsulerie » qui apparaît sur le cadastre dès 1846. Elle a été poursuivie en exploitation de marnes supra-gypseuses puis en suivant le versant vers le Sud par celle du gypse.

La carrière du centre ville (Sud du cimetière), occupe la partie Ouest du domaine sous miné par les carrières souterraines de haute masse de gypse.

Ces carrières se situent en partie à l'aplomb des carrières de gypse en souterrain ce qui a fortement réduit leur protection naturelle contre les infiltrations d'eau.

2.3.2.3 Les carrières de gypse

Schématiquement, en fonction de la géologie et de la topographie du coteau sud de la butte témoin précédemment citée, on peut rencontrer des affleurements des deux premières masses de gypse du Ludien, la troisième masse n'y apparaît pas directement, tout du moins au niveau des exploitations.

De nombreuses carrières à ciel ouvert ont été identifiées sur la commune de Montreuil. Toutefois, on ne peut exclure la présence de carrière inconnue, en raison de la topographie de la zone des carrières connues. Les données de sondages révèlent des épaisseurs de remblais non négligeables sur le pourtour des différents sites de carrières de gypse, bien répertoriés.

Lorsque le recouvrement reste faible, le parti d'extraire les matériaux à ciel ouvert était le plus adapté pour les carriers.

La connaissance des carrières à ciel ouvert permet de repérer les fronts de taille susceptibles d'apporter des instabilités en surface par éboulement des falaises laissées en place.

Parc des Guilands

Dès la partie la plus haute, des carrières à ciel ouvert ont été ouvertes, de glaises vertes tout d'abord puis assez rapidement les carriers ont entaillé le versant Sud des Buttes à Morel dans la haute masse de gypse. Un tunnel passait dans les terrains entre la surface et la 2^{ème} masse exploitée en souterrain pour joindre l'exploitation à ciel ouvert de Haute Masse et l'usine à plâtre en contre bas vers le boulevard Chanzy. Ce tunnel est inscrit sur les cartes de l'IGC mais la documentation actuelle ne permet pas de savoir dans quel état de conservation il se trouve.

La seconde masse ne semble pas avoir été exploitée à ciel ouvert dans ce secteur. Toutefois la carte indique un secteur de cavages de 2^{ème} masse effondré, secteur probablement exploité à ciel ouvert afin de permettre l'accès aux carrières souterraines.

Parc des Beaumonts

Les carriers y ont exploité les 2 premières masses à ciel ouvert, peu de descriptions et de localisations exactes existent dans les archives de l'IGC. Toutefois, il semble que la hauteur de recouvrement ait été un facteur déterminant pour les entrées en cavage. Ainsi la 2^{ème} masse a très probablement été exploitée à ciel ouvert avenue Jean Moulin. A partir de 18 m de remblais, cette exploitation a été continuée en souterrain. La plupart des entrées en cavage se situent entre la rue Stalingrad et la rue Molière.

La Haute Masse semble avoir été exploitée systématiquement dès qu'elle était saine. Les entrées en cavage, dissimulées sous les remblais, forment un alignement pratiquement Nord Sud dans le parc des Beaumonts. Au Sud, les entrées en cavage sont regroupées autour de la rue des Charmes. Apparemment la hauteur de recouvrement augmente très rapidement dès les lignes de cavages.

Schématiquement, en fonction de la géologie et de la topographie des coteaux Ouest et Sud du parc des Beaumonts, on peut rencontrer des affleurements assez bas en altitude. Il est fort probable que l'exploitation des 2^{ème} et 3^{ème} masses s'étend bien au Sud du Parc, à ciel ouvert ou en souterrain. Cette partie est mal connue.

2.3.3 Inventaire des carrières souterraines connues à Montreuil

Pour que l'exploitation en souterrain soit possible, il est nécessaire que le banc de toit de l'exploitation en question soit suffisamment épais et en bon état.

2.3.3.1 Les carrières de travertins de Brie

Les carrières souterraines de marnes ou de travertins de Brie sont très mal connues. Elles sont le plus souvent artisanales et très réduites. Les plans sont exceptionnels et c'est lors de travaux ou d'incidents, le plus souvent, qu'elles sont découvertes, essentiellement sur la partie Est de Montreuil. Elles ne se superposent pas aux zones sous minées par des carrières de gypse ludien.

A Montreuil, ces carrières se rencontrent sous très faible recouvrement, généralement 1,50 m. Les galeries font de 2 à 4 m de large et 1,80 m en moyenne de haut.

On y extrayait des caillasses pour l'édification de clôtures, pour des empierrements ou pour les murs à pêches, célèbres à Montreuil. Ces carrières y sont souvent liées.

2.3.3.2 Les carrières de gypse ludien

Quand le recouvrement est devenu trop important, l'exploitation à ciel ouvert a été poursuivie en souterrain. C'est le cas de la haute masse (ou 1^{ère} masse) et de la 2^{ème} masse.

Il existe des carrières de 1^{ère}, 2^{ème} et 3^{ème} masses. Elles sont elles-mêmes en partie affectées par des dissolutions.

La carrière de l'Ouest ou carrière des Guilands ou des Buttes à Morel

Elle a été en majorité exploitée dans la deuxième moitié du XIX^{ème} siècle par différents propriétaires, dont un dénommé M. Morel. L'arrêté d'autorisation de la plâtrière date du 14 janvier 1864. Elle a été définitivement abandonnée en moment de la Première Guerre Mondiale.

Cette carrière est contiguë à la carrière Sud de Bagnolet.

Elle se compose de deux carrières souterraines, non superposées, ou très peu, de haute masse et de 2^{ème} masse. Il n'existe apparemment pas de carrière de 3^{ème} masse. Elle peut toutefois avoir fait l'objet d'une exploitation à partir de la carrière de 2^{ème} masse. L'Inspection générale des carrières ne dispose pas d'information sur cette question et aucun 3^{ème} étage de carrière souterraine n'a été cartographié.

Les différentes masses plongent légèrement vers le S-SE, probablement avec l'approche du versant.

Masses	Altitude du toit de la masse	Hauteur moyenne de galerie	Observations
Haute Masse	84 à 81 m min 73 m	10 à 11m	Petits piliers tournés zone Nord à grands fontis
2 ^{ème} masse	67 à 65 m min 62 m	max 4 m	Petits piliers tournés secteurs de cavages effondrés
3 ^{ème} masse	61 à 59 m min 55		

L'îlot Nord, au Nord de la rue Hoche, a subi de nombreux et importants fontis, à la limite de l'effondrement généralisé, en ce qui concerne la partie Est. Une partie de ce secteur a été traité (comblement gravitaire et clavage des vides).

La carrière du Sud dite « des Beaumonts »

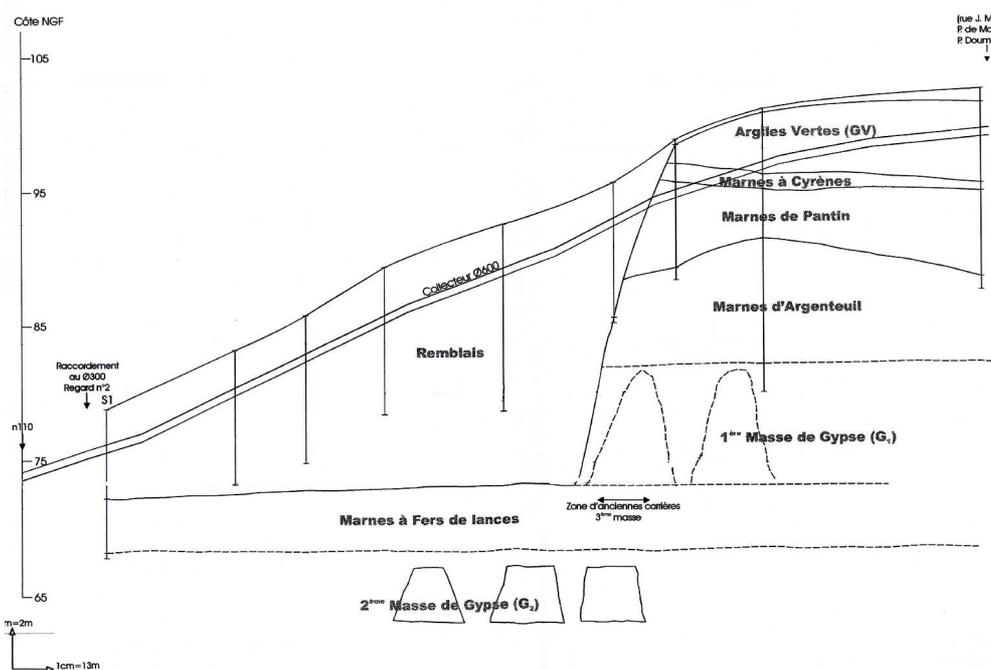
Cette carrière est au Sud du centre-ville de Montreuil. Son extension totale n'est pas connue, il semble que des petits îlots de 3^{ème} masse existent sous les exploitations à ciel ouvert ou souterraines de 2^{ème} masse, au Sud-Ouest de la rue Molière.

Les trois masses ont des caractéristiques à peu près constantes sur l'ensemble du site, répertoriées dans le tableau ci-après :

Masse	Altitude du toit de la masse	Hauteur moyenne de galerie	Observations
Haute Masse	72 à 71 m	De 5 à 10 m	Parfois partiellement remblayée
2 ^{ème} masse	59 à 58 m	De 3 à 4,5 m	Petits piliers
3 ^{ème} masse	54 à 55 m	1,5 à 2,6 m	Parfois eau

Sur ce site, les 3 étages sont superposés, mais les piliers ne le sont pas. De plus les piliers de haute masse sont massifs alors que ceux de 2^{ème} masse sont petits et irréguliers. Les taux de défrètement des carrières, plus particulièrement en haute masse, sont assez forts et peuvent atteindre 70 %, ce qui est très important pour une carrière de gypse.

La partie la plus au Sud de la carrière de haute masse est effondrée, particulièrement à l'endroit où les glaises vertes ont été exploitées à ciel ouvert. Ce secteur était très dangereux avant son comblement en 1987 avec du coulis de cendre volante. Toutefois, le traitement n'a apparemment pas été poursuivi par un traitement des terrains superficiels.



Coupe géologique des carrières à ciel ouvert dissimulant des entrées en cavage de 1^{ère} masse sous l'avenue Jean Moulin, carrière des Beaumonts
Source : LREP

Ces carrières devaient être déjà dangereuses lors de leurs exploitations : toutes les voies de circulations importantes vers les escaliers ou entrées en cavage sont particulièrement renforcées. Elles ont été très peu remblayées en phase d'exploitation et de nombreux fontis sont venus à jour, parfois même peu de temps après l'exploitation. Ainsi la 2^{ème} masse, exploitée en 1842 vers la rue des Ormes, a subi la venue à jour de fontis dès 1855.

La carrière de la Villa de l'Avenir :

Cette carrière est répertoriée sur l'atlas des carrières comme une galerie unique qui mesure 6 m de haut en général, mais peut atteindre 10 m, et 5 m de large au maximum. Elle débute au n°1 de la Villa avec une descenderie en carrière et se trouve à 25 m de profondeur au fond de la Villa, avec un maximum de 33 m au niveau du n°7. Elle est désaxée par rapport à la Villa.

Des fontis importants sont venus à jour tout au long de cette galerie. Cette carrière n'est que très partiellement remblayée, d'origine.

En conclusion, les carrières de gypse de Montreuil ont été exploitées par la méthode des piliers tournés, avec parfois des taux de défrètement importants. Les piliers ne se superposent pas d'un étage à l'autre et leur taille diminue en fonction de la profondeur. Les effondrements peuvent se rencontrer entre les piliers ou se produire par écrasement des piliers d'un étage inférieur, et donner naissance à des fontis ou à des affaissements plus ou moins importants en fonction du taux de remblayage local de la carrière.

2.3.4 Les karsts gypseux identifiés à Montreuil

Dans les carrières de gypse ludien, il n'est pas rare de rencontrer des diaclases ouvertes. Ces diaclases, associées aux phénomènes dus aux versants, entraînent des décalages dans les blocs de gypse (improprement appelés failles), ainsi que des éboulements.

Dans la zone entre les deux parcs de Montreuil, lieux d'exploitation des carrières, existe un ancien thalweg où se rencontrent également sous les formations de pente, ces formations gypseuses. Elles sont fortement altérées par les ruissellements qu'elles ont subi. Ces dissolutions et altérations ne forment pas à proprement parlé des karsts gypseux, mais apportent des décompressions voire de petits affaissements qui peuvent être non négligeables quand l'épaisseur du banc gypseux d'origine est importante.

2.4 CARACTÉRISATION ET CARTOGRAPHIE DES ALÉAS ANCIENNES CARRIÈRES ET DISSOLUTION DU GYPSE

La notion d'aléa est usuellement décrite comme le croisement de l'intensité du phénomène (type de phénomène redouté, ampleurs des désordres ou impacts des phénomènes) avec sa probabilité d'occurrence (prédisposition du site et facteurs aggravants).

2.4.1 Évaluation de l'aléa pour les carrières

L'intensité de l'aléa est définie à partir de plusieurs critères qui sont :

- la présence de cavités,
- le contexte géologique et hydrogéologique de l'environnement,
- la présence de facteurs aggravants.

La présence de cavités, anthropiques ou naturelles

Compte tenu de l'échelle de travail (1/5 000^{ème}), on admettra que toutes les cavités sont semblables : leur taux de défrètement moyen avoisine 60 % et les épaisseurs résiduelles de travertin ou de gypse au toit et au mur n'excèdent pas 1 mètre.

Les critères géométriques de l'exploitation (section des galeries, disposition des piliers, épaisseur des bancs) ainsi que les critères géotechniques (comportement mécanique, état d'endommagement des toits, des piliers, épaisseur des bancs résiduels) sont déterminants pour l'évaluation de l'aléa.

La superposition de plusieurs cavités est aussi un facteur déterminant.

Le contexte géologique et hydrogéologique de l'environnement

La hauteur de recouvrement (puissance) ainsi que ses caractéristiques géologiques et géotechniques sont déterminants pour caractériser l'aléa.

Ce contexte détermine l'intensité de l'aléa, notamment à partir des critères suivants :

- la carrière est à faible profondeur ;
- le front de taille est peu protégé par des couches argileuses imperméables ;
- l'exploitation est à ciel ouvert et les remblais de comblement sont des matériaux hétérogènes parfois perméables permettant des dissolutions ou des entraînements d'éléments fins par l'eau.

Les facteurs aggravants

Ils ont été détaillés dans le paragraphe 2.2.2. Il s'agit essentiellement de la présence d'eau qui peut avoir une grande influence sur les propriétés mécaniques des terrains, et donc sur la stabilité des ouvrages.

Pour une carrière souterraine de gypse par exemple, les couches imperméables des terrains de recouvrement la protégeront de l'altération des eaux météoriques.

Sur ces bases, on peut considérer que les risques de fontis et/ou d'affaissement sont très élevés sur toutes les zones concernées par les anciennes carrières souterraines vides ou partiellement remblayées.

2.4.2 Caractérisation et cartographie de l'aléa pour les carrières

Quatre niveaux d'aléas ont été retenus (très fort, fort, moyen, faible), une zone de protection et une marge de reculement.

Ces deux zones sont définies à partir de la limite connue de la carrière (front de taille).

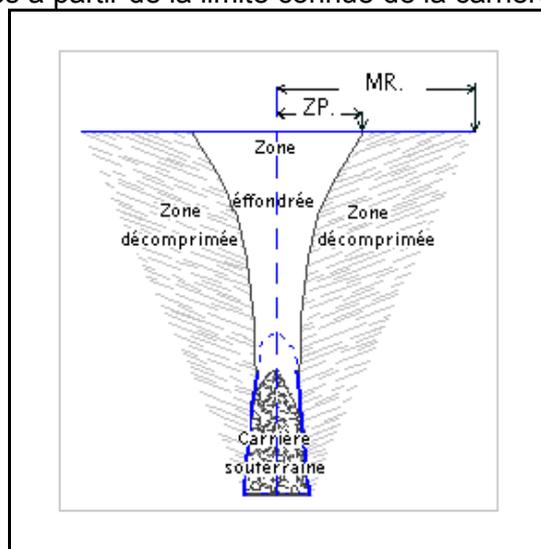


Schéma zone de protection - Marge de reculement
Source : IGC

Une carrière est dite « remblayée » lorsqu'elle a fait l'objet de travaux de remblaiement mais que des vides résiduels décimétriques peuvent subsister.

Une carrière est dite « consolidée » lorsque les vides résiduels, après remblaiement, ont été comblés et clavés, que les remblais de carrières et les terrains décomprimés ont été traités par injection sous pression ou que la carrière a fait l'objet de consolidations par piliers maçonnés appuyés directement sur le pied des niveaux d'exploitation.

2.4.2.1 Zones de protection et marge de reculement

Zone de protection

La zone de protection correspond à la bande de terrain, bordant les emprises sous minées, susceptible de s'effondrer durant, ou relativement peu de temps après la survenance d'un fontis en surface (voir schéma plus haut).

Le délai d'apparition de ces effondrements, et l'extension horizontale de ceux-ci, sont fonction de la dynamique de l'évènement.

Ce débord est dimensionné à partir d'une estimation du diamètre des fontis formés en surface, sa largeur est fixée à :

- ZP = 0 mètre si la carrière est consolidée (aucun vide ne subsiste) ou au niveau des entrées en cavage ;
- ZP = 2 mètres pour les carrières de travertins de Brie ;
- ZP = 5 mètres quand la carrière de gypse de 2^{ème} ou 3^{ème} masse est remblayée ;
- ZP = 10 mètres quand la carrière de gypse est foudroyée en 1^{ère} masse, ou qu'on se trouve en présence que de 2^{ème} ou 3^{ème} masse ;
- ZP = 20 mètres dans les autres cas.

Quand les dénivellations topographiques le permettent, la largeur de cette zone est réduite, en fonction de la pente.

Marge de reculement

La marge de reculement représente la zone d'influence d'un évènement qui s'est produit en surface, ou qui est susceptible de se produire (voir schéma plus haut). Au-delà de cette zone, aucun désordre n'est à craindre pour les aménagements de surface.

La largeur de cette bande de terrain exposée aux effets latéraux des effondrements est fixée :

- MR = 0 mètre dans le cas des carrières consolidées et des entrées en cavage ;
- MR = 4 mètres dans le cas d'une carrière de travertins de Brie ;
- MR = 10 mètres dans le cas des carrières remblayées de 2^{ème} ou 3^{ème} masse de gypse ;
- MR = 20 mètres pour les carrières effondrées de 1^{ère} masse, ou uniquement de 2^{ème} ou 3^{ème} masse ;
- MR = 40 mètres dans les autres cas.

	0 m	2 m	4 m	5 m	10 m	20 m	40 m
ZP	Carrière consolidée, entrée en cavage	Carrière de travertins de Brie	-	Carrière remblayée	Carrière effondrée, 2 ^{ème} ou 3 ^{ème} masse	Tous les autres cas	-
MR	Carrière consolidée et entrées en cavage	-	Carrière de travertins de Brie	-	Carrière remblayée	Carrière foudroyée ou 2 ^{ème} masse uniquement	Tous les autres cas

Tableau récapitulatif des zones de protection et des marges de reculement

2.4.2.2 Détail des aléas

Les grilles ci-dessous présentent les 4 niveaux d'aléas, liés aux carrières, retenus en fonction des critères énoncés précédemment.

cas	Travertin de Brie	Gypse	
		Sous faible recouvrement	Sous fort recouvrement
Fontis repérés	Très fort	Très fort	Très fort à fort
Galeries vides ou partiellement remblayées d'origine	Fort	Très fort	Fort
Galeries « remblayées »	Moyen	Fort	Moyen
Galeries « remblayées » clavées	Faible	Moyen	Faible
Galeries « consolidées »	Faible	Faible	Faible
Exploitation souterraine présumée	Moyen	Fort	Moyen
Puits d'accès non ceinturé	Moyen	Fort	Moyen à fort

Quatre niveaux d'aléas pour les carrières souterraines

Matériaux	Glaises vertes et marnes supra gypseuses	Gypse ludien			Sablières		
		Avérées	Supposées	Traitées	Avérées	Supposées	Traitées
Carrières							
Aléa	Moyen	Fort	Moyen à faible	Moyen à faible	Moyen	Faible	Faible

Trois niveaux d'aléas pour les carrières à ciel ouvert

Présence cumulée de gypse	Moyenne	Importante
Aléa	Faible	Moyen

Deux niveaux d'aléas pour les dissolutions du gypse ludien

Ces niveaux d'aléas ont été cartographiés à l'échelle 1/5 000^{ème}.

Sont classées en **aléa très fort** :

- Les zones de carrières souterraines de gypse ou de travertin de Brie, non « consolidées », non « remblayées », avec fontis repérés ;
- Les zones de carrières de gypse non « consolidées », non « remblayées » avec des galeries vides ou partiellement remblayées d'origine, sous faible recouvrement ;
- Les zones de protection autour des zones de cloches de fontis repérées ou de fontis venus à jour mais non comblés et les zones de carrières souterraines en mauvais état ou vides ou remblayées partiellement dans le cas du gypse sous faible recouvrement.

Sont classées en **aléa fort** :

- Les carrières de gypse à ciel ouvert dont les limites sont connues et n'ayant fait l'objet d'aucun traitement particulier ;
- Les zones de carrières souterraines de travertins de Brie non « consolidées », non « remblayées » ;
- Les zones de carrières souterraines de gypse non consolidées, non « remblayées », quand le recouvrement est important ;
- Les zones de carrières souterraines « remblayées » du gypse sous faible recouvrement ;
- Les zones où l'existence de cavités, dans le gypse, sous faible recouvrement, est probable (ancien plan, indices en surface...) mais dont les limites n'ont pas été reconnues, et où le risque de fontis et/ou d'affaissement est grand ;
- Les zones de puits d'accès non ceinturés en carrière dans le cas du gypse sous faible recouvrement ;
- Les zones de protection correspondant aux carrières souterraines classées en aléa fort ;
- Les marges de reculement autour des carrières souterraines classées en aléa très fort (du fait de la décompression éventuelle des terrains en cas de fontis).

Sont classées en **aléa moyen** :

- Les carrières de gypse à ciel ouvert dont les limites sont mal connues ou traitées ;
- Les carrières de marnes supra-gypseuses et de glaises vertes à ciel ouvert au-dessus des masses de gypse intactes ;
- Les sablières connues, n'ayant fait l'objet d'aucun traitement particulier ;
- Les carrières souterraines de travertin de Brie « remblayées » ;
- Les carrières souterraines de gypse sous fort recouvrement, « remblayées » par remblaiement mécanique ou par injection gravitaire ;
- Les carrières souterraines de gypse, sous faible recouvrement, « remblayées » par remblaiement mécanique ou par injection gravitaire, avec clavage, sans traitement des terrains de recouvrement ;
- Les zones où l'existence de cavités liées aux travertins de Brie est probable, mais dont les limites ne sont pas connues, et où le risque de fontis et/ou d'affaissement existe ;
- Les zones de carrières souterraines de gypse, « remblayées », non « consolidées », ou non connues, où le recouvrement est important ;
- Les zones de puits d'accès non ceinturés en carrière dans le cas du travertin de Brie ;
- Les zones de puits d'accès non ceinturés en carrière dans le cas du gypse sous fort recouvrement ;
- Les zones sensibles aux dissolutions de gypse ludien pseudo-morphosé, où les épaisseurs de gypses subsistant peuvent être importantes ;
- Les zones de protection correspondant aux carrières souterraines classées en aléa modéré ;
- Les marges de reculement autour des carrières souterraines classées en aléa fort.

Sont classées en **aléa faible** :

- Les carrières de gypse à ciel ouvert dont les limites sont connues et « remblayées » avec traitement particulier ;
- Les sablières non connues ou traitées ;
- Les carrières souterraines de travertin de Brie, « remblayées » par remblaiement mécanique ou par injection gravitaire, avec clavage, sans traitement des terrains de recouvrement ;
- Les carrières souterraines de gypse, sous fort recouvrement, remblayées par remblaiement mécanique ou par injection gravitaire, avec clavage, sans traitement des terrains de recouvrement ;
- Les carrières souterraines « consolidées » ;
- Les zones sensibles aux dissolutions de gypse ludien pseudo-morphosé, où les épaisseurs de gypses subsistant sont plus réduites ;
- Les zones de protection correspondant aux carrières souterraines classées en aléa faible ;
- Les marges de reculement des zones classées en aléa modéré.

3 L'ALÉA MOUVEMENT DE TERRAIN LIÉ AU RETRAIT-GONFLEMENT DES SOLS ARGILEUX

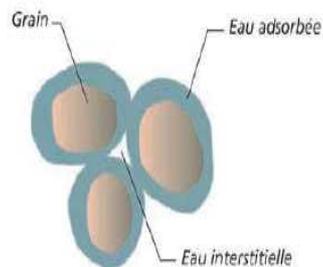
3.1 PRÉSENTATION DU PHÉNOMÈNE NATUREL

3.1.1 Introduction au phénomène de retrait-gonflement

Le phénomène de retrait-gonflement concerne les sols sensibles aux variations de teneur en eau. Il s'agit surtout des sols fins argileux, limoneux ou marneux. En particulier, les sols qui comprennent en proportion importante des argiles telles que les smectites, les illites ou les montmorillonites peuvent subir des déformations importantes.

Le retrait-gonflement est principalement régi par des phénomènes de capillarité et de succion, qui sont particulièrement importants lorsque les sols sont fins. En effet, plus les pores des sols sont petits, plus l'eau est susceptible d'être absorbée et de rester "incorporée" aux matériaux. C'est le cas inverse de celui des sols très poreux, dans lesquels l'eau est peu retenue et circule sous l'effet de la gravité.

Lorsqu'un sol argileux est soumis au phénomène d'évaporation, son volume va d'abord diminuer de façon proportionnelle avec la teneur en eau tout restant dans un état saturé (les vides étant toujours remplis par de l'eau). Cette diminution de volume peut avoir lieu verticalement (tassement) mais aussi horizontalement (apparition de fissures de dessiccation). Lorsque la teneur en eau devient trop faible, le volume ne diminue plus : l'eau des vides s'évapore et ceux-ci se remplissent d'air. Il se développe des pressions de succion très importantes. Les seules particules d'eau qui demeurent sont fixées par attraction moléculaire sur les particules du sol : on parle d'eau « liée » ou d'eau d'absorption.



Source : PRIM.net

Lorsqu'un sol argileux s'humidifie, les vides se remplissent dans un premier temps jusqu'à la saturation, sans que le volume de sol change. Après saturation, si l'apport en eau se poursuit, le sol peut être amené à dépasser son volume initial, ce qui se traduit par un phénomène de gonflement.

Les sols argileux ne se comportent pas tous de la même façon lorsqu'ils sont soumis à des variations de la teneur en eau. Leur sensibilité aux variations de teneur en eau dépend de plusieurs facteurs.

3.1.1.1 La nature du sol

Les réactions du sol vont différer selon les propriétés et la proportion des argiles qu'il contient. Les argiles sont composées d'alumino-silicates hydratés associés à un ou plusieurs ions qui tapissent la surface des grains solides (tels que les cations associés au calcium, au sodium, au potassium, ou au fer). A l'échelle microscopique, les grains d'argile sont agencés en plaquettes formées par un empilement de feuillets.

Les grains ne sont pas électriquement neutres. Certaines argiles à structure complexe, tels que les argiles inter-stratifiées, ont la capacité de réaliser de multiples échanges ioniques et d'incorporer des molécules d'eau entre leurs feuillets. L'introduction de cette eau inter-réticulaire va conduire à l'hydratation des ions échangeables et à l'augmentation de leur diamètre à l'origine du gonflement.

Certains minéraux argileux, comme la montmorillonite, sont caractérisés par leur grande capacité à absorber de l'eau, et donc à changer de volume. Dans les sols contenant de telles argiles, les déformations, retrait ou gonflement, peuvent donc parfois atteindre des proportions importantes.

3.1.1.2 L'état de contrainte du sol et/ou sa modification

Si un sol argileux se trouve dans un état de compacité élevé (s'il est par exemple « surconsolidé » du fait de la présence d'un bâtiment ou d'un remblai), il sera moins affecté par les variations de teneur en eau.

D'autre part, l'enlèvement de charges ou l'ajout de surcharges sur le sol peuvent se traduire en surface par des soulèvements ou des tassements. Ces déformations peuvent apparaître par exemple suite à une construction de remblais, à un remaniement lors de terrassements...

3.1.1.3 Le changement de l'environnement hydrique du sol

Les variations affectant le niveau de la nappe phréatique, la teneur en eau et le degré de saturation influencent les variations de volume du sol.

3.1.2 **Facteurs intervenant dans le processus**

On distingue plusieurs facteurs :

- Les *facteurs de prédisposition* constituent les conditions nécessaires à l'apparition de ce phénomène et déterminent la répartition spatiale de l'aléa. La seule présence de ces facteurs ne suffit pas à déclencher le phénomène. Les facteurs de prédisposition sont permanents et conditionnent la répartition spatiale du phénomène.
- Les *facteurs internes* sont liés à la nature du sol. Les principaux éléments qui influent sur la susceptibilité au retrait-gonflement sont la proportion de matériaux argileux, la géométrie des couches (une couche épaisse en position superficielle sera plus sensible qu'une couche fine en profondeur), et la composition minéralogique des argiles.
- Les *facteurs d'environnement* sont liés aux principales caractéristiques du site. Ce sont des facteurs de prédisposition car leur présence dans un secteur signifie que celui-ci est susceptible d'être concerné par le risque de retrait-gonflement. On peut citer les facteurs suivants :
 - la végétation : les racines des arbres soutirent l'eau du sol, par succion, en provoquant une dépression locale et une migration de l'eau autour d'elles. Les espèces d'arbres ayant le plus d'influence sur le phénomène de retrait-gonflement sont les chênes, les peupliers, les cèdres... Les massifs de buissons ou d'arbustes implantés au droit des façades peuvent également causer des dégâts importants.

- la topographie : la présence d'une pente favorise le ruissellement et le drainage, tandis qu'un terrain plat pourra recueillir des eaux stagnantes qui ralentiront la dessiccation du sol. D'autre part, une maison construite sur un terrain en pente est souvent plus sensible au problème de retrait-gonflement, car il existe une dissymétrie entre les fondations amont (qui sont enterrées plus profondément) et avalées (qui sont ancrées dans des couches superficielles davantage soumises à l'évaporation).
- la circulation d'eaux souterraines : la présence d'une nappe ou d'une source rend le phénomène de retrait-gonflement plus complexe. Les fluctuations des nappes, telles qu'un abaissement prolongé, ont un impact direct sur les variations hydriques des sols et de leurs caractéristiques mécaniques.
- l'exposition : l'exposition d'un terrain conditionnant son ensoleillement, elle peut avoir une influence sur l'amplitude des phénomènes d'évaporation.

Ces facteurs environnement sont également des *facteurs aggravants* car leur présence accentue les effets du phénomène.

- les **facteurs de déclenchement** ont une influence directe sur le phénomène : ils le provoquent. Cependant ils n'ont d'effet significatif que s'il existe des facteurs de prédisposition préalables. La connaissance de ces facteurs permet de déterminer l'occurrence du phénomène.
 - la climatologie : le principal facteur de déclenchement est d'ordre météorologique : il s'agit d'un phénomène de sécheresse exceptionnelle, c'est à dire qui n'est pas assimilable à des variations climatiques saisonnières. Les deux paramètres importants qui permettent de qualifier ce type de phénomène météorologique sont les précipitations et l'évapotranspiration (évaporation provoquée par les conditions de température, de vent et d'ensoleillement + transpiration c'est-à-dire eau absorbée par la végétation). Lorsque la période de sécheresse a été précédée ou s'est vue accompagnée d'épisodes pluvieux importants, les variations de teneur en eau sont encore plus conséquentes et leur effet sur le retrait-gonflement des sols s'en ressent davantage.
 - les facteurs anthropiques : certaines interventions ou circonstances (arrosage, fuite de canalisations, obstruction de drains, présence de sources de chaleur en sous-sol...) peuvent réduire ou augmenter les apports d'eau et aggraver les déséquilibres hydriques et donc les mouvements différentiels de sol.

3.2 DESCRIPTION DES DÉSORDRES

3.2.1 **Mécanisme expliquant l'apparition des désordres**

3.2.1.1 Pendant la sécheresse

Pendant une période de sécheresse intense, la teneur en eau des couches constitutives du sol diminue fortement. Les couches superficielles, soumises à évaporation, se rétractent. Ce retrait peut aller jusqu'à la fissuration du sol. Par contre, le sol situé sous un bâtiment conserve un équilibre hydrique sensiblement constant, car la présence d'une telle construction constitue un écran à l'évaporation : la surface occupée par le bâtiment constitue une couche imperméable. Il existe donc un déséquilibre entre la partie centrale (où la teneur en eau est pratiquement constante) et la périphérie du bâtiment (directement exposée à l'évaporation). Ce phénomène est susceptible d'entraîner des mouvements différentiels de sols au droit des façades.

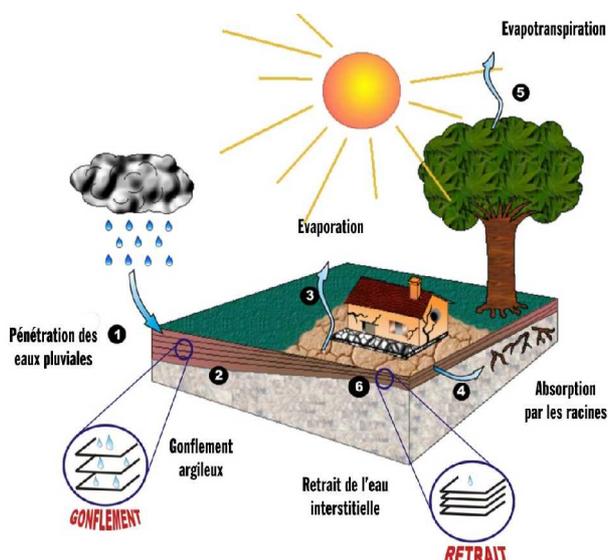
Les tassements différentiels peuvent parfois atteindre plusieurs centimètres. Le retrait peut supprimer localement le contact entre la fondation et le terrain d'assise et entraîner l'apparition de vides.

3.2.1.2 Au retour des pluies

Au retour des précipitations, les sols s'humidifient à nouveau. Cependant, il est fréquent qu'ils ne retrouvent pas exactement leur volume initial, ce qui explique que, dans certains cas, les fissures apparues suite à la sécheresse ne se referment pas complètement après des précipitations importantes.

Le phénomène inverse peut également se produire : lorsque des pluies particulièrement longues et intenses tombent sur un sol constitué d'argiles particulièrement gonflantes, il peut arriver que la réhydratation provoque un gonflement d'amplitude supérieure et entraîne de nouveaux désordres.

De même que pour le phénomène de retrait en période de sécheresse, les déformations entraînées par le phénomène de gonflement ne sont pas uniformes. Ces gonflements différentiels sont susceptibles de provoquer des soulèvements affectant les dallages et les structures des constructions.



3.2.2 **Manifestations des désordres affectant les constructions**

Les mouvements différentiels du terrain d'assise d'une construction se traduisent par l'apparition de désordres qui affectent l'ensemble du bâti et qui sont en général les suivants.

3.2.2.1 Sur le gros-œuvre

- Fissuration des structures enterrées ou aériennes

Ces fissurations atteignent parfois plusieurs centimètres et peuvent être inclinées selon diverses orientations (verticale, horizontale, angle à 45°). Plusieurs orientations sont souvent présentes en même temps.

Les fissures rejoignent souvent les points faibles que constituent les ouvertures, que cela soit dans les cloisons, murs ou planchers.

- Déversement de structures fondées de manière hétérogène

Ce phénomène affecte les parties situées à des niveaux différents. Par exemple, l'existence d'un sous-sol partiel rend une structure plus exposée au risque de déversement.

- Désencastrement des éléments de charpente ou de chaînage
- Dislocation des cloisons

3.2.2.2 Sur le second-œuvre

- Distorsion des ouvertures

Ce phénomène peut gêner et/ou empêcher le bon fonctionnement des portes et des fenêtres.

- Décollement des éléments composites (matériaux différents assemblés par superposition)

Les carrelages, les plâtres peuvent subir des flexions ou des compressions selon le plan d'assemblage.

- Étirement, mise en compression ou rupture de tuyauteries et canalisations

Cela peut concerner les tuyaux ou canalisations d'eau potable, d'eaux usées, de gaz, de chauffage central, de rejet d'eaux pluviales (gouttières).

3.2.2.3 Sur les aménagements extérieurs

Les aménagements particulièrement sensibles sont les dallages et les trottoirs périphériques, les terrasses et escaliers extérieurs, les petits bâtiments accolés (garage, atelier), les murs de soutènement...

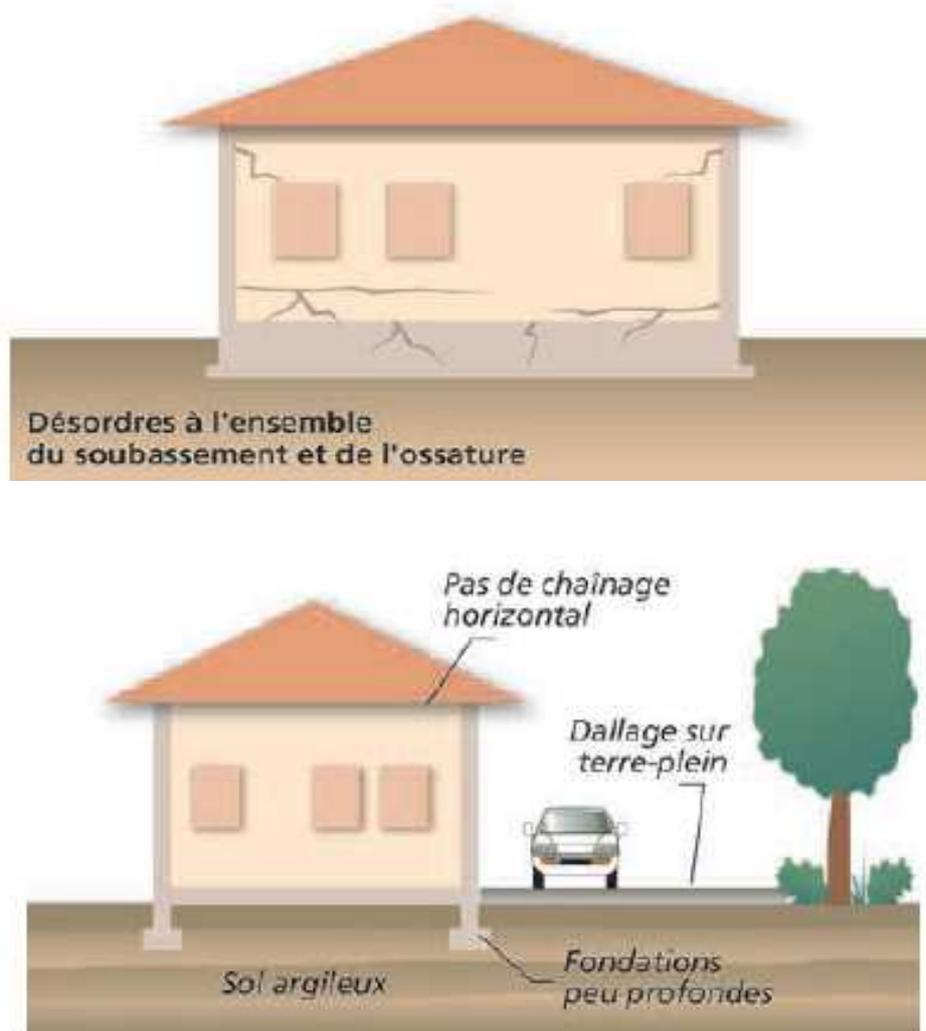
La nature, l'intensité et la localisation de ces désordres dépendent de la structure de la construction, du type de fondation réalisée et bien sûr de l'importance des mouvements différentiels de terrain subis.

Les désordres concernent surtout les constructions dites "légères" telles que les maisons individuelles. En effet, les constructions plus "lourdes" tels que les immeubles et autres bâtiments de taille importante sont moins exposés à ce type de désordres car :

- leurs fondations sont suffisamment profondes, ce qui rend leur structure moins sensible au phénomène de retrait ;
- leur poids leur permet d'exercer une pression suffisante sur le sol, limitant ainsi le phénomène de gonflement.

L'exemple type de la maison sinistrée par la sécheresse est :

- une maison individuelle (structure légère) ;
- à simple rez-de-chaussée avec dallage sur terre-plein voire sous-sol partiel ;
- fondée de façon relativement superficielle généralement sur des semelles continues, peu ou non armées et peu profondes (fondations ancrées à une profondeur inférieure à 80 cm) ;
- avec une structure en maçonnerie peu rigide, sans chaînage horizontal et reposant sur un sol argileux.



Source : PRIM. Net

3.3 PRÉSENTATION DE LA MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE D'ALÉA RÉALISÉE PAR LE BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES (BRGM)

Depuis la fin des années 1980, la région Ile-de-France, et en particulier le département de la Seine-Saint-Denis qui est classé en neuvième position des départements français en terme de coûts cumulés d'indemnisation en novembre 2006, font partie, à l'échelle nationale, des secteurs qui ont été les plus touchés par des désordres du bâti survenus suite à des mouvements de sols consécutifs à des périodes de sécheresse exceptionnelle.

Afin d'établir, pour l'ensemble du département de la Seine-Saint-Denis, une cartographie de l'aléa lié au phénomène de retrait-gonflement des sols argileux, la Direction Départementale de l'Équipement de la Seine-Saint-Denis (DDE de la Seine-Saint-Denis) a engagé la réalisation d'une étude auprès du Service Géologique Régional Ile-de-France du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM).

Une première cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles avait été publiée en octobre 2001 sur le département de la Seine-Saint-Denis. C'est à partir de cette connaissance du risque retrait-gonflement que le projet de plan de prévention du risque argileux départemental avait été élaboré puis soumis à une enquête publique fin 2002-début 2003. Depuis 2001, le BRGM a introduit de nouveaux critères pour caractériser l'aléa.

Suite à ce changement de méthodologie, la direction régionale de l'environnement (DIREN) a sollicité le BRGM pour une révision des premières cartes établies, notamment celle du département de la Seine-Saint-Denis.

La méthodologie utilisée consiste à suivre les différentes étapes suivantes.

3.3.1 Détermination du cadre géographique et géologique départemental

Le département de la Seine-Saint-Denis, fortement urbanisé, compte 1,4 millions d'habitants¹ répartis sur 40 communes sur une superficie totale de 236 km².

Deux grandes entités peuvent être distinguées :

- la moitié nord du département est caractérisée par une assez large dépression correspondant à la Plaine de France (altitude entre 40 m et 50 m). Le substratum est constitué par le calcaire de Saint-Ouen. La partie centrale de cette zone est tapissée d'importantes formations alluviales (correspondant au lit d'un ancien cours d'eau) ;
- la partie sud est une région de plateaux dont les points culminants sont situés à des altitudes dépassant 100 m. Elle constitue la "plate forme de Brie", et a été entaillée par les cours ancien et actuel de la Marne. Au nord du fleuve, les principales zones de relief marqué correspondent aux secteurs suivants (d'Ouest en Est) : plateau de Romainville, plateau d'Avron, massif de l'Aulnay. La partie située au sud de la Marne est marquée par la présence du plateau de Noisy-le-Grand. La formation constituant le sommet de ces reliefs est celle du calcaire de Brie, mais elle se présente sous des faciès différents : au nord de la Marne, la faciès est à dominante gypseuse et est soumis au phénomène d'érosion, alors qu'au sud du fleuve, le faciès calcaire forme une barrière plus difficile à franchir et que les rivières ont dû contourner.

Les formations géologiques qui affleurent sur le département de la Seine-Saint-Denis sont nombreuses (une vingtaine) et de natures diverses. Elles font partie de la série sédimentaire tertiaire et quaternaire du bassin parisien. Elles s'échelonnent de la formation des Sables de Beauchamp, pour la plus ancienne, aux formations alluviales et colluviales, pour les plus récentes. Entre ces deux couches, les formations marneuses et gypseuses de la période tertiaire sont encadrées par des couches comprenant des éléments argileux en proportion importante.

La cartographie des formations argilo-marneuses du département a été élaborée à partir :

- de la carte géologique des formations argilo-marneuses réalisée à l'occasion de l'élaboration de la carte d'aléa en 2001 ;
- des coupes de forage de la banque des données du Sous-Sol (BSS) gérée par le BRGM ;
- de la carte géologique harmonisée d'Ile-de-France disponible depuis 2003-2004.

¹ Au recensement de 1990, la Seine-Saint-Denis comptait 1 381 191 habitants.

3.3.3 Examen des autres facteurs de prédisposition ou de déclenchement

Les critères topographiques (niveau de pente et exposition des versants), hydrogéologiques (influence des nappes phréatiques comme frein à la dessiccation des sols), végétation ou le type de fondation du bâti n'ont pas été pris en compte dans la cartographie des zones de susceptibilité au retrait-gonflement, la plupart de ces facteurs n'intervenant que de manière très locale et ne pouvant, par conséquent, pas être cartographiés à l'échelle départementale.

3.3.4 Recensement et localisation géographique des sinistres

Entre 1991 et 2003, 32 communes du département de la Seine-Saint-Denis ont été reconnues en état de catastrophe naturelle au titre des mouvements de terrain différentiels liés à des périodes de sécheresse exceptionnelle. Ces communes représentent à elles seules une superficie de près de 84 % de la superficie totale du département.

L'examen des dossiers techniques constitués par les mairies pour reconnaissance de catastrophe naturelle a permis d'étudier les pathologies, de définir la nature des terrains « à risque » et de recueillir le nombre de sinistrés par commune.

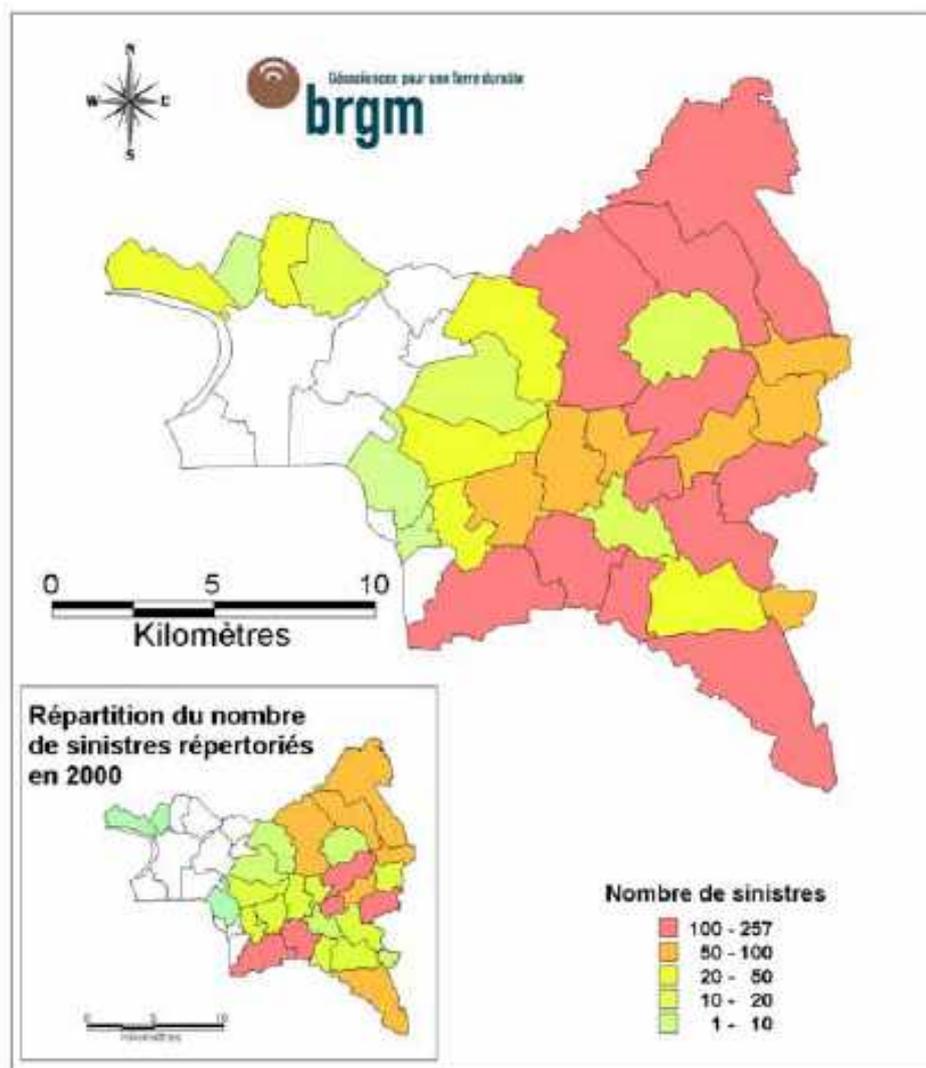
3.3.4.1 Répartition géographique des sinistres

Les sinistres pris en compte sont constitués des données déjà recensées par Donsimoni et al (2001) lors de l'établissement de la carte d'aléa retrait-gonflement des argiles en Seine-Saint-Denis (1 427 sinistres sinistrés), de 34 sinistres complémentaires issus de la banque de données établies par le CEBTP-SOLEN dans le cadre d'un programme de recherche² ainsi que des données géoréférencées par la direction départementale de la Seine-Saint-Denis pour l'année 2003, soit 1 088 sites. Après élimination des doublons, c'est un total de 2 451 sites de sinistres qui a servi de base pour l'analyse et la cartographie.

A partir d'un fichier d'adresses, ces sinistres ont été précisément localisés, dans un premier temps, sur des cartes de voiries communales, puis reportés sur des fonds topographiques à l'échelle du 1 / 25 000^{ème}. Une base de données géoréférencée a ainsi été établie.

² VINCENT M. ; « Retrait-gonflement des sols argileux : un aléa géologique lié aux conditions climatiques » ; *Géosciences* (la revue du BRGM pour une terre durable) ; n°3 ; mars 2006 ; pp. 50 à 55.

Le traitement de ces données a permis de réaliser la cartographie suivante :



Carte des sinistres recensés dans le département de la Seine-Saint-Denis
Source : BRGM

L'examen des données de sinistres indique que tous les sinistres répertoriés et localisés sauf un sont répartis sur les formations argilo-marneuses retenues comme être sujettes au phénomène de retrait-gonflement (ces dernières occupent la quasi-totalité du département).

Cette carte permet d'illustrer que la répartition des sinistres n'est pas quelconque, mais qu'elle obéit à la fois à des critères géologiques et morphologiques. La plupart des sinistres sont en effet situés selon des bandes d'affleurement de formations géologiques continues sur une grande partie du département. Par ailleurs, ils sont généralement situés sur les versants des vallées, ainsi que sur les rebords des plateaux. Dans les autres secteurs, il existe aussi des sinistres mais de plus faible intensité.

3.3.4.2 Détermination de la densité de sinistres selon le type de formation géologique

Pour obtenir des densités de sinistres qui soient comparables d'une formation à une autre, le nombre de sinistres par formation a été rapporté à 100 km² de formation géologique bâtie.

Dans un souci de rigueur et, étant donné le fort taux d'urbanisation de certains secteurs du département, il a paru nécessaire de pondérer ces densités de sinistres en tenant compte du taux d'urbanisation correspondant à chacune des formations géologiques.

Les densités de sinistres ont ainsi été rapportées à la surface urbanisée.

3.4 CARACTÉRISATION ET CARTOGRAPHIE DE L'ALÉA RETRAIT-GONFLEMENT DES SOLS ARGILEUX

3.4.1 Détermination du degré de susceptibilité

Pour déterminer le degré de susceptibilité d'une formation géologique donnée au retrait-gonflement, trois critères ont été pris en compte :

- le critère lithologique

Une note allant de 1 à 4 a été donnée à chacune des formations argilo-marneuses identifiées, en fonction de sa richesse en minéraux argileux gonflants.

La note de 1 correspond à des formations non argileuses mais contenant localement des passées ou des poches argileuses.

La note de 2 correspond à des formations présentant un terme argileux non prédominant de type calcaire argileux ou sable argileux.

La note de 3 correspond à des formations à dominante argileuse, présentant un terme ou une passée non argileuse ou très mince.

La note de 4 correspond à des formations essentiellement argileuse ou marneuse d'épaisseur supérieure à 3 mètres et continue.

- le critère minéralogique

Une note allant de 1 à 4 a été donnée à chacune des formations argilo-marneuses identifiées, en fonction de sa richesse en minéraux argileux gonflants.

La note de 1 correspond à des formations comprenant moins de 25 % de minéraux gonflants dans leur fraction argileuse ;

La note de 2 correspond à des formations comprenant entre 25 % et 50 % de minéraux gonflants dans leur fraction argileuse ;

La note de 3 correspond à des formations comprenant entre 50 % et 80 % de minéraux gonflants dans leur fraction argileuse ;

La note de 4 correspond à des formations comprenant plus de 80 % de minéraux gonflants dans leur fraction argileuse.

- le critère géotechnique

Une note allant de 1 à 4 a également été attribuée à chacune des formations, en fonction des résultats d'essais géotechniques disponibles, et principalement à partir de l'indice de plasticité (Ip), qui permet de qualifier l'étendue du domaine plastique et de qualifier l'aptitude du matériau argileux à acquérir de l'eau.

Plus l'indice de plasticité est important, plus le sol est à même d'incorporer de l'eau et de changer de volume.

Les notes sont d'autant plus élevées que l'indice de plasticité est important. Au final, chaque formation est caractérisée par trois notes, une pour chacun des critères pris en compte. La moyenne des trois notes permet de calculer, pour chaque formation, un degré de susceptibilité générale vis à vis du retrait-gonflement.

3.4.2 Détermination du critère « densité de sinistres »

La densité de sinistres par formation géologique est calculée en prenant en compte la surface bâtie de chaque formation. La densité calculée est en moyenne pour les formations retenues comme argilo-marneuses de 8 483 sinistres pour 100 km² d'affleurement actuellement bâtie.

Afin de hiérarchiser les formations argilo-marneuses selon leur degré de sinistralité, c'est le seuil de 8 500 sinistres pour 100 km² qui a été retenu comme référence et à partir duquel ont été définies les coupures suivantes pour l'attribution de notes caractérisant la sinistralité :

Une note allant de 1 à 3 a ainsi été attribuée à chaque type de formation.

La note de 1 correspond à moins de 8 500 sinistres pour 100 km² de surface bâtie dans la formation.

La note de 2 correspond à un nombre de sinistres compris entre 8 500 et 17 000 pour 100 km².

La note de 3 correspond à un nombre de sinistres supérieur à 17 000 pour 100 km².

N° Ordre	Notation	Nom de la formation argilo-marneuse	Note lithologique	Note minéralogique	Note géotechnique	Note finale	Degré de susceptibilité
1	X	Remblais	1	1	1	1,00	Faible
2	CE	Colluvions polygéniques	3	2	3	2,67	Moyen
3	LP	Limons des plateaux	2	2	2	2,00	Faible
4	Rfv/g1CB	Argiles à meulière de Brie	3	2	3	2,67	Moyen
5	Fz	Alluvions récentes	2	1	2	1,67	Faible
6	Fx-y	Alluvions anciennes : niveaux Fx et Fy indifférenciés (5-30 m)	1	1	1	1,00	Faible
7	g1MH	Marnes à huîtres	4	3	3	3,33	Fort
8	g1CB	Calcaire de Brie et Calcaire de Sannois et Argiles à meulière	2	2	2	2,00	Faible
9	g1AR	Argiles vertes de Romainville et Glaises à Cyrènes	4	4	4	4,00	Fort
10	e7MS	Marnes supragypseuses : Marnes blanches de Pantin et Marnes bleues d'Argenteuil	4	3	3	3,33	Fort
11	e7G	Masses et marnes du gypses	2	3	4	3,00	Moyen
12	e7CCh-MP	Calcaire de Champigny et Marnes à Pholadomies	2	2	3	2,33	Moyen
13	e7MP	Marnes à Pholadomies	3	3	3	3,00	Moyen
14	e6-7MGC	Marnes à Pholadomies et Formation du Gypse, Quatrième Masse	2	3	3	2,67	Moyen
15	e6SM	Sables de Monceau	2	1	2	1,67	Faible
16	e6CSO	Calcaire de Saint Ouen, Horizon de Mortefontaine localement et Calcaire de Ducy	1	2	2	1,67	Faible
17	e6SB-A	Sables de Beauchamp et Sables d'Auvers	1	3	1	1,67	Faible

Susceptibilité des formations argilo-marneuses retenues
Source : BRGM

Aucune note de sinistralité n'a été attribuée à deux formations (note de densité de sinistres jugée non significative et notée N.S.) dont la surface bâtie est nulle à quasi nulle et qui, de ce fait, ne présentent pas de sinistres ou un nombre de sinistres très faible. La surface bâtie de ces deux formations est si réduite que la présence d'un seul sinistre fait immédiatement passer la densité de sinistre de 0 à une valeur très forte qui conduirait à lui attribuer une note élevée de sinistralité. Dans ce cas de figure, le paramètre de sinistralité ne peut donc pas être considéré comme significatif et être pris en compte pour caractériser l'aléa. La classe d'aléa finalement retenue pour ces formations sera donc équivalente à celle évaluée pour leur susceptibilité.

3.4.3 Détermination du degré d'aléa

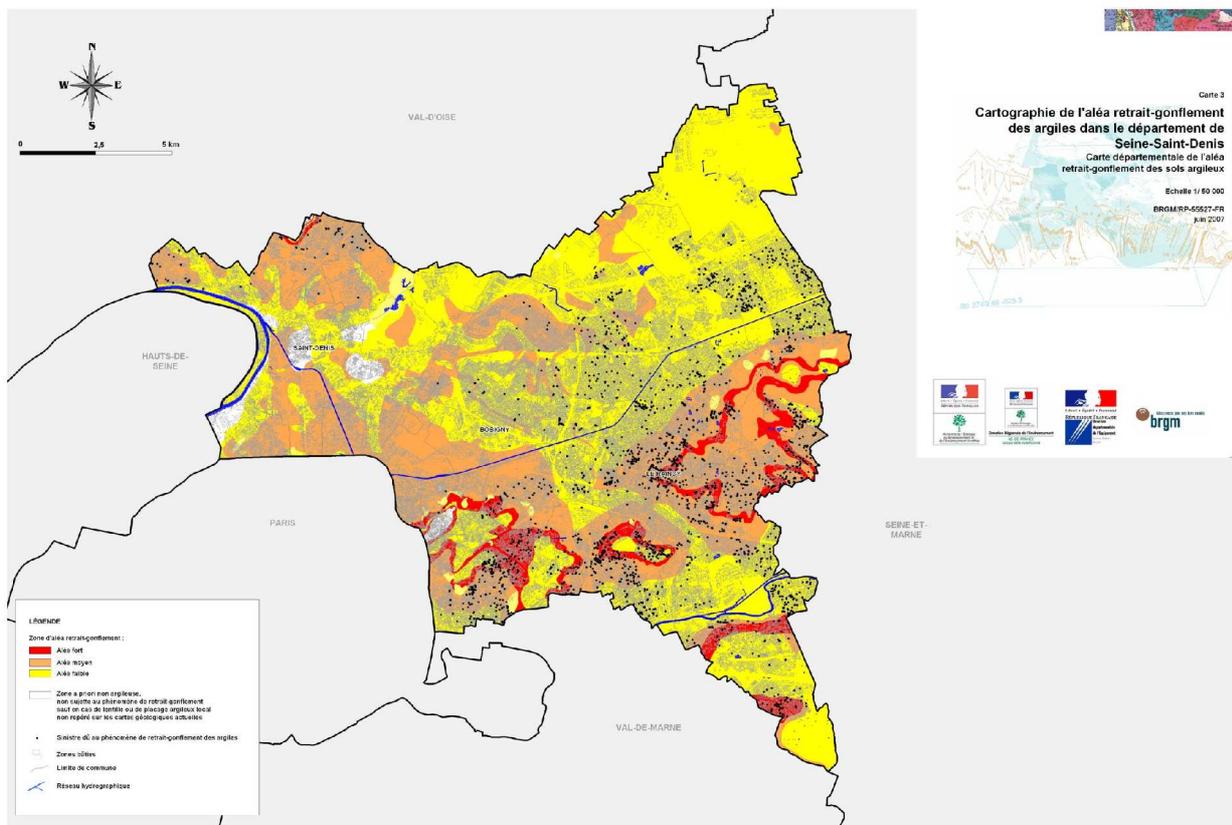
L'indice d'aléa est finalement obtenu en additionnant la note de densité de sinistres et le double de la note de susceptibilité.

On obtient alors ainsi des notes allant de 3 à 9.

Trois niveaux d'intensité d'aléa ont alors été déterminés à partir d'un classement suivant la valeur de cet indice :

- **aléa faible** (note d'aléa égale à 3, 4 ou 5) ;
- **aléa moyen** (note d'aléa égale à 6 ou 7) ;
- **aléa fort** (note d'aléa égale à 8 ou 9).

La carte d'aléa a ensuite été tracée à partir de la carte synthétique des formations à dominante argileuse ou marneuse, en attribuant à chacune des formations identifiées l'un des trois niveaux d'aléas définis ci-dessus.



Carte départementale de l'aléa retrait-gonflement dans le département de la Seine-Saint-Denis
Source : BRGM

3.5 CONCLUSIONS DE L'ÉTUDE

L'étude d'aléa réalisée par le BRGM permet d'affiner de manière significative la connaissance des zones sensibles au retrait-gonflement dans le département de la Seine-Saint-Denis. Elle constitue donc un document utile à l'information préventive à l'usage des municipalités, des assureurs, des maîtres d'ouvrage et des constructeurs. Une telle étude de connaissance du risque constitue un outil à l'usage des experts pour le diagnostic des futurs sinistres sécheresse et la détermination des solutions de confortement à proposer.

Si le phénomène de retrait-gonflement n'est pas de nature à rendre une zone inconstructible, il implique néanmoins de prendre certaines dispositions constructives pour prévenir les désordres. Ces techniques de prévention, différentes selon l'intensité du risque, ont fait l'objet de deux études complémentaires (BRGM et LREP), qui ont permis à la DDE de déterminer les dispositions constructives à respecter dans le cadre de constructions neuves et les mesures à prendre pour préserver l'existant. Les éléments relatifs à la mise en œuvre de ces dispositions : explications techniques, présentation des objectifs de prévention qu'elles permettent d'atteindre et de leur efficacité, estimation de leur coût... seront détaillées dans la partie réglementaire.

4 CARTES DES DIFFÉRENTS ALÉAS MOUVEMENTS DE TERRAIN

A partir de la méthodologie de détermination des aléas décrite dans le chapitre 2 pour les risques de mouvements de terrain liés à la présence d'anciennes carrières et à la dissolution du gypse et dans le chapitre 3 pour les risques de mouvements de terrain liés au retrait-gonflement des sols argileux, les cartes d'aléas suivantes ont été élaborées :

- une carte des aléas mouvements de terrain liés à la présence d'anciennes carrières à l'échelle du 1/5 000^{ème} sur la commune de Montreuil ;
- une carte des aléas mouvements de terrain liés à la dissolution du gypse à l'échelle du 1/5 000^{ème} sur la commune de Montreuil ;
- une carte des aléas mouvements de terrain liés au retrait-gonflement des sols argileux à l'échelle du 1/25 000^{ème} sur la commune de Montreuil.

5 ANALYSE DES ENJEUX

L'analyse des enjeux a été réalisée à l'échelle de la commune de Montreuil. Sont recensés les enjeux existants et futurs concernés par les risques de mouvements de terrain.

L'analyse des enjeux est faite par thème :

- Enjeux d'aménagement global : zones destinées à être aménagées de manière globale, avec des projets relatifs à des thématiques variées (aménagements paysagers, de loisirs, habitat, équipements commerciaux...), et zones caractérisées par une mixité des fonctions (commerces, habitat, activités...).
- Enjeux de mobilité : secteurs et infrastructures existants ou futurs susceptibles d'être impactés par le risque.
- Enjeux paysagers : zones existantes ou futures situées en zone d'aléa dont la destination principale est le loisir ou le sport, ainsi que les zones d'aménagement paysager.
- Enjeux liés aux équipements sensibles : enjeux existants ou futurs qui en cas de sinistre peuvent présenter soit un risque d'aggravation du sinistre (par pollution par exemple), soit être affectés par le sinistre et priver une partie de la population d'un service d'intérêt général.
- Enjeux humains : enjeux de population et ceux liés aux établissements accueillant des personnes dites « sensibles » (enfants, personnes âgées, personnes hospitalisées...) difficilement évacuables, ainsi que les secteurs d'habitat spécifique (par exemple : aire d'accueil des gens du voyage...).

5.1 ENJEUX D'AMÉNAGEMENT GLOBAL

5.1.1 Le développement de l'offre de logements autour du tramway Noisy-le-Sec / Val de Fontenay

Parallèlement au projet de prolongement sud du tramway T1 entre Noisy-le-Sec et Val de Fontenay, le projet urbain autour de la voie dénommée avenue A186, permettra de résorber la coupure urbaine générée par la voie, en faisant émerger un nouveau quartier de qualité proposant une nouvelle offre de logements autour des stations de tramway.

Le projet permettra notamment de valoriser le site patrimonial des murs à pêches, traversé par le prolongement du tramway. Ce site de 38 hectares doit son nom à la présence de murs de plâtre anciennement utilisés dans le cadre de la culture de la pêche : ils constituaient un écran retenant la chaleur et ainsi favorisaient le développement des fruits. Ce type d'agriculture s'est implanté à Montreuil au 16^{ème} siècle et a subsisté jusque dans les années 1950. Aujourd'hui, les murs n'ont été conservés que dans certains secteurs comme le quartier Saint-Antoine.

Ce site figure actuellement au schéma départemental de la région Ile-de-France (SDRIF) en zone urbanisable avec un pourcentage de terrains en espaces verts, et une partie (ensemble formé par 4 secteurs du quartier Saint-Antoine et couvrant une superficie totale de 8,6 ha) a été classée fin 2003 au titre de la protection des sites prévue au code de l'environnement.

5.1.2 Le développement de l'offre de logements, équipements et commerces dans le centre-ville : ZAC Coeur de Ville

Le projet, localisé au cœur de Montreuil, vise à redynamiser le centre-ville, requalifier les espaces publics et améliorer les liaisons entre ce secteur et les autres quartiers.

La ZAC Cœur de Ville prévoit l'aménagement de 24 000 m² de SHON : près de la moitié de la surface sera vouée aux commerces, le reste se répartissant entre logements, bureaux et équipements.

Le centre d'art dramatique a été livré en 2007. La livraison du centre commercial "Grand angle" et des logements est prévue pour 2012.

A proximité de la ZAC, l'ensemble Espoir-Wilson-Gallieni, composé de 599 logements, fait l'objet d'un projet de réhabilitation.

5.1.3 Le développement du tertiaire et la réhabilitation de l'habitat en lien avec le grand projet de renouvellement urbain (GPRU) de la Porte de Montreuil dans le secteur du bas Montreuil et de la rue de Paris

Dans ce secteur soumis à une forte pression foncière du fait de sa proximité de Paris, l'enjeu majeur consiste à assurer un nouvel équilibre entre logements, commerces et activités.

Les enjeux relatifs à l'action sur l'habitat concernent le développement et la diversité de l'offre de logement et la requalification du parc existant. Le quartier du Bas Montreuil a été présenté à l'ANRU fin 2008 dans le cadre du Programme National de Réhabilitation des Quartiers Anciens Dégradés.

La limite banlieue de la Porte de Montreuil constitue une zone d'activités tertiaires. Les enjeux dans ce secteur concernent le développement de ces activités, la diversification de l'offre commerciale en favorisant l'implantation en rez-de-chaussée de commerces ou de services aux habitants et employés, l'utilisation des disponibilités foncières correspondant aux anciennes friches industrielles.

Le secteur de la Porte de Montreuil est l'un des 11 sites prioritaires du GPRU de Paris. Les objectifs du projet portent notamment sur l'amélioration du cadre de vie, l'implantation de nouveaux services, de nouvelles activités économiques et commerciales, et le développement des liens entre Paris et les communes voisines notamment par le biais de passerelles supplémentaires pour permettre le franchissement piétonnier du boulevard périphérique de Montreuil à Paris.

5.1.4 La reconstitution de l'offre de logements du fait du processus de rénovation urbaine dans le quartier de Bel Air / Grands Pêchers

Ce quartier de 5 000 habitants, classé en zone urbaine sensible (ZUS), fait l'objet d'un projet de rénovation urbaine et sociale (PRUS). L'objectif principal de ce projet partenarial est la requalification du secteur, laquelle se traduit par les enjeux suivants : amélioration de l'habitat et des équipements, restructuration de la trame viaire, intégration paysagère des aménagements et des résidentialisations, meilleure insertion du quartier dans la ville et une redynamisation commerciale.

Le site présente des qualités paysagères très appréciables en proche banlieue parisienne : il s'agit d'un secteur assez boisé, à proximité du parc des Beaumonts et du secteur des murs à pêches. Le projet de rénovation urbaine vise donc à améliorer et renforcer les liaisons avec les secteurs voisins. Les interventions sur l'habitat présentent une diversité tant en terme de typologie des logements (petit collectif, habitat individuel, variété des hauteurs de bâtiments...) que d'offre de logements (programmes d'accession à la propriété, implantation de l'association foncière logement, programme de logements et d'ateliers d'artistes...).

5.2 ENJEUX DE MOBILITÉ

5.2.1 Le développement des liaisons de rocade : tramway Noisy-le-Sec / Val de Fontenay et projet de rocade ferrée périphérique

Un des axes prioritaires du Contrat de Projets Etat-Région 2007-2013 est constitué par le développement des transports en commun, en particulier des liaisons de rocade (principalement en mode tramway en Proche Couronne).

Le prolongement du tramway T1 Saint-Denis / Bobigny / Noisy-le-Sec jusqu'à Val de Fontenay s'inscrit dans ce cadre. Ce projet permettra d'améliorer la desserte des cinq villes traversées, de redynamiser et relier entre eux les centres villes, de garantir aux voyageurs un mode de transport rapide, direct et régulier, de compléter le maillage avec le réseau de transports en commun (notamment les lignes de bus inscrites au réseau Mobilien) et d'améliorer le rabattement sur les RER A et E.

Le schéma de principe concernant un premier tronçon a été approuvé en conseil d'administration du STIF d'octobre 2002. Le projet est retenu au Contrat de Projets Etat-Région 2007-2013 au titre des études et des premiers travaux. Le Contrat de Projets Etat-Région prévoit également la réalisation d'études sur le projet d'« Arc Express », qui consiste en la création d'un réseau en rocade de type métro automatique. Le principe du projet est de proposer à la fois la création d'un réseau maillé avec les lignes de métro existantes ou en projet et les lignes de RER en proche couronne de Paris, mais aussi de constituer un support de développement urbain sur les secteurs qui accueilleront une station.

Tout en répondant à un objectif de développement de l'offre en transports en commun pour les déplacements de banlieue à banlieue et en rocade, ce projet devra permettre d'améliorer la qualité de service de certaines des lignes de métro les plus saturées, tout particulièrement la ligne 13.

Le Syndicat des Transports d'Ile-de-France (STIF) a lancé au mois de juillet 2008 des études permettant d'aboutir à la réalisation d'études d'insertion de tracés, d'impacts sommaires et de préparation d'un dossier d'objectifs et de caractéristiques principales (DOCP). Parallèlement, le STIF a lancé en parallèle des études exploratoires quant aux modalités de financement du projet.

5.2.2 Le maillage avec les liaisons radiales : prolongements des lignes 9 et 11

Le SDRIF de 1994 et le projet de SDRIF en cours d'élaboration prévoient le prolongement de la ligne 9 jusqu'à Montreuil-Murs à Pêches et de la ligne 11 jusqu'à Rosny-Bois Perrier. Ces prolongements de lignes de métro permettront de desservir des pôles de développement ou des zones denses enclavées.

Le prolongement de la ligne de métro 11 a pour objectif d'offrir une desserte efficace de Paris pour un territoire où les ménages sont peu motorisés, inciter à un report modal conséquent de la voiture particulière vers les transports en commun pour les ménages motorisés dans cette zone dense de proche couronne et permettre un maillage avec le tramway T1 à Romainville, le RER EOLE à Rosny-sous-Bois ainsi qu'avec les lignes de bus Mobilien 105, 115, 301, 318 et 143.

Le prolongement de la ligne 11 est inscrit au Contrat de Projets Etat-Région 2007-2013 au titre des études et des premiers travaux.

5.3 ENJEUX PAYSAGERS

5.3.1 *La prise en compte des risques dans les aménagements des espaces verts (parc des Guilands et parc des Beaumonts)*

Le parc départemental Les Guilands - Jean Moulin (26 ha) et le parc des Beaumonts (11 ha) sont tous deux situés sur des zones d'anciennes carrières souterraines. Une partie du secteur du parc des Guilands a déjà fait l'objet de travaux de comblement.

Dans le cadre de projets visant à valoriser ces espaces paysagers, la prise en compte des risques et la mise en place de travaux de prévention constitueraient de forts enjeux.

Depuis un arrêté ministériel du 26 avril 2006, le parc des Guilands et le parc des Beaumonts font partie du site NATURA 2000 - Sites de Seine-Saint-Denis et sont donc à ce titre des zones de protection spéciale.

5.3.2 *La valorisation du site classé et du secteur des murs à pêches*

Une partie du site des murs à pêches (ensemble formé par 4 secteurs du quartier Saint-Antoine et couvrant une superficie totale de 8,6 ha) a été classée fin 2003 au titre de la protection des sites prévue par l'article L.341-1 du code de l'environnement. Le décret du 16 décembre 2003 portant classement du site des murs à pêches a en effet reconnu le caractère pittoresque et historique de ce secteur.

Le secteur fait l'objet d'une réflexion portant à la fois sur la question de la valorisation paysagère du site incluant notamment l'entretien et la restauration des murs, la préservation de la faune et de la flore, et sur la création d'un espace pédagogique permettant de mieux faire découvrir ce site au grand public et aux scolaires et d'entretenir la mémoire du lieu.

5.4 ENJEUX LIÉS AUX ÉQUIPEMENTS SENSIBLES

Les équipements sensibles actuellement soumis à législation sur les installations classées (autorisations) sont situées en majorité sur les zones d'aléa moyen ou faible d'effondrement ou d'affaissement liés aux anciennes carrières ou à la dissolution du gypse.

Cette liste évolue rapidement dans le temps mais on peut noter que la zone industrielle MOZINOR, la zone industrielle rue de Rosny et la société TECHNOLYSE sont situées en zone de risque fort d'affaissement et d'effondrement d'anciennes carrières.

5.5 ENJEUX HUMAINS

5.5.1 *Données générales*

	Superficie	Habitants	Entreprises privées	Emplois	Densité
MONTREUIL	892 ha	101 587	2 971	28 903	11 389 hab/km ²

Sources : Insee 2006, GARP 2005, Chambre des Métiers.

5.5.2 Recensement des établissements sensibles

La carte des enjeux fait figurer les établissements sensibles qui se trouvent en zone soumise à un aléa très fort ou fort de risque d'effondrement ou d'affaissement de carrières. A noter, le cimetière Jean Moulin est en partie en zone de risque très fort d'effondrement ou d'affaissement d'anciennes carrières.

5.5.3 Analyse de la carte des enjeux de population

La représentation cartographique réalisée à partir des informations « Densimos 1999 » (information relative à la population par îlot, établie sur la base du recensement de la population de 1999) montre une proportion importante de ménages concernés directement par le risque modéré d'affaissement ou d'effondrement liés aux anciennes carrières et à la dissolution du gypse.

6 ÉLABORATION DU ZONAGE RÉGLEMENTAIRE

6.1 MÉTHODOLOGIE D'ÉLABORATION DU ZONAGE RÉGLEMENTAIRE

Le zonage réglementaire est établi selon la méthodologie suivante à partir de la cartographie des différents aléas mouvements de terrain (affaissement-effondrement liés aux anciennes carrières, affaissement-effondrement liés à la dissolution du gypse et retrait-gonflement des sols argileux) et de l'analyse des enjeux.

Les aléas sont classés selon leur nature (risque d'affaissement et d'effondrement liés à la présence d'anciennes carrières, risque d'affaissement et d'effondrement liés à la dissolution du gypse et risque lié au retrait-gonflement des sols argileux) et selon leur degré d'intensité (très fort, fort, moyen et faible). A chaque degré d'aléa est associé un niveau de risque.

6.1.1 Le risque d'affaissement et d'effondrement liés à la présence d'anciennes carrières, trois classes d'exposition ont été définies :

6.1.1.1 Carrières de gypse et sablières

Un niveau de risque « **très élevé** » correspondant aux zones d'aléa « très fort ».

Ces zones, soumises à un risque très élevé d'affaissement et d'effondrement liés à la présence d'anciennes carrières et où les mesures de prévention sont généralement inapplicables en raison de leur importance, sont jugées inconstructibles.

Un niveau de risque « **élevé** » correspondant aux zones d'aléa « fort ».

Dans ces zones fortement exposées au risque d'affaissement et d'effondrement liés à la présence d'anciennes carrières, les constructions futures sont autorisées mais fortement réglementées compte-tenu de l'ampleur des dispositions constructives à mettre en œuvre.

Un niveau de risque « **modéré** » correspondant aux zones d'aléas « moyen » et « faible ».

Dans ces zones moyennement exposées au risque d'affaissement et d'effondrement liés à la présence d'anciennes carrières, des mesures de prévention sont à mettre en œuvre.

6.1.1.2 Carrières de Travertins de Brie

Le regroupement effectué est légèrement différent : le niveau de risque « **élevé** » correspond aux zones d'aléas « fort » et « moyen », et le niveau de risque « **modéré** » correspond aux zones d'aléa « faible ». En effet, les zones d'aléa « fort » lié aux carrières de Travertins correspondent le plus souvent à des incidents repérés et sont donc très réduites. Compte-tenu de la faible superficie de ces zones et du fait qu'il est probable que des incidents de même nature se produisent à proximité de ces zones, il a été choisi d'étendre les zones de risque « élevé » aux zones d'aléa « moyen » entourant les zones d'aléa « fort ».

6.1.2 Concernant le risque d'affaissement et d'effondrement liés à la dissolution du gypse, un seul niveau de risque a été défini :

Il s'agit du niveau de risque « **modéré** » correspondant aux zones d'aléas « moyen » et « faible ».

Dans ces zones moyennement exposées au risque d'affaissement et d'effondrement liés à la dissolution du gypse, des mesures de prévention sont à mettre en œuvre.

6.1.3 Concernant le risque lié au retrait-gonflement des sols argileux, deux classes d'exposition ont été définies :

Un niveau de risque « **élevé** » correspondant aux zones d'aléa « fort » augmentées d'une marge de sécurité de 50 m de largeur, afin de tenir compte de l'imprécision des contours résultant de l'extrapolation de la carte des aléas réalisée à l'échelle du 1/50 000^{ème}.

Un niveau de risque « **modéré** » correspondant aux zones d'aléa « moyen » et « faible » diminuées d'une bande de 50 m de largeur.

6.2 CROISEMENT MULTIRISQUES

Une proposition de règlement multirisques mouvement de terrain sur cette commune a été travaillée par la DDE de la Seine-Saint-Denis et le LREP. Les règlements pris en compte sont : le règlement-type carrières de l'IGC, le règlement-type gypse de l'IGC, le règlement-type argile du BRGM. Une nécessaire mise en cohérence des différents règlements conduit logiquement à donner priorité aux mesures les plus contraignantes. Dans le cas de la commune de Montreuil-sous-Bois, d'importantes simplifications au niveau du zonage réglementaire ont été envisagées.

Ces simplifications portent principalement sur deux cas rencontrés :

- Le croisement multirisques conduit à considérer des règlements aux contraintes de différentes intensités.

Dans ce cas, les mesures les plus contraignantes (associées à l'aléa le plus défavorable) ont été conservées, sans occulter toutefois la présence des autres aléas.

Exemple : zone concernée par un risque « carrières » fort et un risque « argiles » fort.

La présence du risque « carrières » implique des mesures beaucoup plus contraignantes que celles liées au risque « argile », et notamment une étude géotechnique pour tout projet de construction. Dans le croisement multirisques, il a donc été proposé de prescrire cette étude, en prenant les dispositions constructives nécessaires à la prévention des deux risques.

- Le croisement multirisques conduit à considérer des mesures propres à la prévention de chaque risque, qui se révèlent être similaires.

Dans ce cas, une homogénéisation des mesures a été faite, en prenant garde de conserver les spécificités liées aux différents risques.

Exemple : zone concernée par les risques « carrières » modéré et « argiles » fort ou zone concernée par les risques « gypse » modéré et « argiles » fort.

Dans ces deux cas distincts, chaque règlement « type » recommande notamment une étude géotechnique garantissant la stabilité de la construction (respectivement vis-à-vis du risque « carrières » ou « gypse ») et interdit les ouvrages d'infiltration et de pompage. Ces deux zones, a priori concernées par des aléas distincts, ont été regroupées lors du croisement multirisques en une seule zone réglementaire homogène (ce qui se justifie d'ailleurs par la similarité de manifestation des désordres liés aux aléas « carrières » ou « gypse »).

Le croisement de ces différentes zones de risque aboutit au zonage réglementaire suivant :

Type de risque	Type de risque		Risque lié au retrait-gonflement des sols argileux		
	Intensité de l'aléa	Intensité de l'aléa	fort	moyen	faible
		Niveau de risque correspondant	élevé	modéré	
Risque d'affaissement et d'effondrement liés à la présence d'anciennes carrières	très fort	très élevé	A	A	
	fort	élevé	B	B	
	moyen	modéré	C	D	
	faible				
Risque d'affaissement et d'effondrement liés à la dissolution du gypse	moyen	modéré	C	D	
	faible				
Aucun risque d'affaissement ou d'effondrement repéré	-	-	E	F	

6.3 OBJECTIFS DE PRÉVENTION POUR CHAQUE ZONE

La zone A (représentée en rouge foncé) est la zone soumise à un risque très élevé d'affaissement et d'effondrement liés à la présence d'anciennes carrières. Elle est également soumise à un risque (élevé ou modéré) de retrait-gonflement des sols argileux.

Objectifs de la zone A :

- Limiter le nombre de personnes et de biens exposés au risque de mouvements de terrain liés à la présence d'anciennes carrières ;
- Contrôler strictement l'extension de l'urbanisation ;
- Renforcer la sécurité des personnes vis à vis du risque de mouvements de terrain liés à la présence d'anciennes carrières ;
- Limiter les dommages matériels susceptibles d'être générés par des effondrements ou affaissements de terrain ;
- Diminuer les risques de mouvements de terrain en prenant des mesures visant à limiter les apports d'eau dans le sous-sol.

La zone B (représentée en bleu foncé) est la zone soumise à un risque élevé d'affaissement et d'effondrement liés à la présence d'anciennes carrières ou à la dissolution du gypse. Elle est également soumise à un risque (élevé ou modéré) de retrait-gonflement des sols argileux.

Objectifs de la zone B :

- Renforcer la sécurité des personnes vis à vis des risques de mouvements de terrain liés à la présence d'anciennes carrières ou à la dissolution du gypse ;

- Limiter les dommages matériels susceptibles d'être générés par des effondrements ou affaissements de terrain ;
- Assurer la pérennité des constructions futures en rendant obligatoire des dispositions constructives spécifiques visant à garantir leur stabilité vis à vis des effondrements et tassements de sol ;
- Diminuer les risques de mouvements de terrain en prenant des mesures visant à limiter les apports d'eau dans le sous-sol.

La zone C (représentée en bleu clair) est la zone soumise à un risque modéré d'affaissement et d'effondrement liés à la présence d'anciennes carrières ou à la dissolution du gypse. Elle est également soumise à un risque élevé de retrait-gonflement des sols argileux.

Objectifs de la zone C :

- Renforcer la sécurité des personnes vis à vis des risques de mouvements de terrain liés à la présence d'anciennes carrières ou à la dissolution du gypse ;
- Limiter les dommages matériels susceptibles d'être générés par des effondrements ou affaissements de terrain et par le phénomène de retrait-gonflement des sols argileux ;
- Diminuer les risques de mouvements de terrain en prenant des mesures visant à limiter les apports d'eau dans le sous-sol.

La zone D (représentée en bleu clair hachuré) est la zone soumise à un risque modéré d'affaissement et d'effondrement liés à la présence d'anciennes carrières ou à la dissolution du gypse. Elle est également soumise à un risque modéré de retrait-gonflement des sols argileux.

Objectifs de la zone D :

- Renforcer la sécurité des personnes vis à vis des risques de mouvements de terrain liés à la présence d'anciennes carrières ou à la dissolution du gypse ;
- Limiter les dommages matériels susceptibles d'être générés par des effondrements ou affaissements de terrain et par le phénomène de retrait-gonflement des sols argileux ;
- Diminuer les risques de mouvements de terrain en prenant des mesures visant à limiter les apports d'eau dans le sous-sol.

La zone E (représentée en jaune) est la zone soumise à un risque élevé de retrait-gonflement des sols argileux. Aucun autre risque de mouvement de terrain n'a été repéré en l'état actuel des connaissances.

Objectifs de la zone E :

- Réduire la vulnérabilité des constructions et renforcer leur résistance aux mouvements de terrain provoqués par le retrait-gonflement des sols argileux ;

- Diminuer l'intensité du phénomène de retrait-gonflement en prenant des mesures visant à maintenir un profil hydrique constant au voisinage des fondations et ainsi à limiter les variations d'humidité sous tout ou partie de la construction.

La zone F (représentée en jaune hachuré) est la zone soumise à un risque modéré de retrait-gonflement des sols argileux. Aucun autre risque de mouvement de terrain n'a été repéré en l'état actuel des connaissances.

Objectifs de la zone F :

- Réduire la vulnérabilité des constructions et renforcer leur résistance aux mouvements de terrain provoqués par le retrait-gonflement des sols argileux ;
- Diminuer l'intensité du phénomène de retrait-gonflement en prenant des mesures visant à maintenir un profil hydrique constant au voisinage des fondations et ainsi à limiter les variations d'humidité sous tout ou partie de la construction.