



INSPECTION GÉNÉRALE  
DES CARRIÈRES  
86, rue Régnault  
75013 – Paris

# PLAN DE PREVENTION DES RISQUES MOUVEMENTS DE TERRAIN

*ANCIENNES CARRIERES*

Identification des phénomènes et des aléas  
liés à la présence d'anciennes carrières



Commune de Pantin

juin 2022



## Sommaire

<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>5</b>
<b>1. PRÉSENTATION .....</b>	<b>7</b>
2. 1. GÉOLOGIE DE PANTIN APPLIQUÉE AUX RISQUES.....	9
2. 2. CONSÉQUENCE DE L'HYDROGÉOLOGIE SUR LES CARRIÈRES ET LA DISSOLUTION .....	11
2. 3. EXPLOITATIONS DES MATÉRIAUX ET DISSOLUTIONS.....	11
2. 3. 1. <i>Matériaux exploités et taux de défrètement</i> .....	11
2. 3. 2. <i>Dissolutions de gypse</i> .....	14
<b>3. DESCRIPTION SOMMAIRE DES DÉSORDRES .....</b>	<b>17</b>
3. 1. DÉFINITION DES DÉSORDRES .....	17
3.1.1 <i>Aléas liés à la remontée à la surface des désordres dus aux anciennes carrières souterraines et à ciel ouvert et aux karsts.</i> .....	18
3.1.2 <i>Les glissements de terrain liés aux carrières</i> .....	21
3. 2. FACTEURS AGGRAVANT LE PROCESSUS DE DÉGRADATION DES CARRIÈRES .....	21
<b>4. APERÇU HISTORIQUE DES CARRIÈRES À PANTIN .....</b>	<b>23</b>
<b>5. MÉTHODOLOGIE : ÉTUDE ET RÉPARTITION DES ALÉAS À PANTIN.....</b>	<b>25</b>
5.1 - ÉVALUATION DE L'ALÉA POUR LES CARRIÈRES.....	25
5.2. - CARACTÉRISATION ET CARTOGRAPHIE DE L'ALÉA LIÉ À LA DISSOLUTION DU GYPSE ANTÉLUDIEN	26
5.3. - CARACTÉRISATION ET CARTOGRAPHIE DE L'ALÉA POUR LES CARRIÈRES.....	27
<i>Une carrière vide est une carrière entièrement vide ou avec des vides métriques</i> .....	27
5.3.1. <i>Zones de protection et marge de reculement</i> .....	28
5.3.2. <i>Détail des aléas</i> .....	29
5.3.3. <i>Précisions utiles à la cartographie de l'aléa carrières</i> .....	32

## Illustrations

<b>Tableau 1 : Tableau récapitulatif des zones de protection et des marges de reculement .....</b>	<b>29</b>
<b>Tableau 2 : Trois niveaux d'aléas pour les carrières à ciel ouvert .....</b>	<b>29</b>
<b>Tableau 3 : Quatre niveaux d'aléas pour les carrières souterraines .....</b>	<b>30</b>
<b>Figure 1 : Extrait du tableau d'assemblage des cartes de carrières de l'IGC .....</b>	<b>7</b>
<b>Figure 2 : Extrait de la carte géologique réalisée au 1/20000 – quart Nord Est de Paris.....</b>	<b>9</b>
<b>Figure 3 : Coupe schématique des terrains .....</b>	<b>10</b>
<b>Figure 4 : Schéma d'une carrière à ciel ouvert remblayée, masquant une entrée en cavage et sous minées par d'autres carrières souterraines .....</b>	<b>13</b>
<b>Figure 5 : mécanisme de venue à jour d'un fontis dans le cas d'une superposition d'étage.....</b>	<b>19</b>
<b>Figure 6 : Extrait de l'Atlas Départemental de la Seine de 1874 (révision) .....</b>	<b>23</b>
<b>Figure 7 : Méthodologie de la cartographie de l'aléa lié à la dissolution du gypse ante-ludien .....</b>	<b>26</b>
<b>Figure 8 : Schéma zone de protection - marge de reculement.....</b>	<b>27</b>
<b>Photo 1 : Maquette de l'Inspection générale des carrières montrant une carrière de gypse ludien à ciel ouvert et souterraine .....</b>	<b>12</b>
<b>Photo 2 : Schéma d'une carrière souterraine exploitée par la méthode des piliers tournés dans le gypse ludien .....</b>	<b>13</b>
<b>Photo 3 : Exemple d'un fontis de carrière de gypse de 1ere masse à Pantin (2016).....</b>	<b>19</b>

## Introduction

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

En vertu de l'arrêté inter-préfectoral du 26 janvier 1966, l'IGC doit être consultée dans les communes de l'ancien département de la Seine pour toute autorisation d'urbanisme en zone de carrière. Pour la commune de Pantin, l'arrêté préfectoral du 16 décembre 1986 modifié le 18 avril 1995 vient préciser la notion de zone de risque lié aux anciennes carrières et y adjoindre celle de zone de risque lié aux poches de dissolution du gypse antéludien. Il y prévoit la saisine de l'IGC, ou de tout organisme compétent en la matière (depuis 1995), pour toute autorisation d'urbanisme. Pris en application de l'ancien article R 111-3 du Code l'urbanisme, cet arrêté a aujourd'hui valeur de Plan de Prévention des Risques Mouvement de Terrain (PPRMT).

En vue de l'établissement d'un plan de prévention des risque naturels et à la demande de l'Etat, l'Inspection générale des carrières a élaboré, à partir des données alors disponibles, une carte d'aléas carrières livrée en 2016. Le 25 janvier 2021, le Préfet de la Seine-Saint-Denis a pris un arrêté afin de faire connaître la première carte d'aléas produite par l'IGC (PAC : Porté à Connaissance). Toutefois, depuis 2016, plusieurs campagne de sondages conduites par la Ville de Pantin ont permis d'améliorer significativement la connaissance de l'état de remblaiement de ces carrières et l'Etat a demandé à l'Inspection générale des carrières de réviser la carte d'aléas initiale pour en tenir compte.

Le présent document résume la méthodologie de l'élaboration de l'étude d'aléas et les caractéristiques des carrières de gypse à Pantin. Après un exposé du type de désordres et des facteurs aggravant les phénomènes d'instabilité, les aléas sont décrits et synthétisés afin de permettre d'en donner une cartographie simple. Ce document technique a vocation à être repris en partie dans la note de présentation du PPRMT et est accompagné des cartes d'aléa « aléa lié à la présence d'anciennes carrières à Pantin ».

À partir de ce document technique pourra être défini un règlement qui prendra en compte les enjeux en regard des aléas. Le document réglementaire du PPRMT, élaboré par la Direction Régionale et Interdépartementale de l'Environnement, de l'Aménagement et des Transports d'Île de France (DRIEAT) en concertation avec l'IGC et les autres experts missionnés, s'attachera à proposer des dispositions réglementaires dont la prise en compte conditionnera la constructibilité éventuelle des zones sous-minées ou exposées à un risque de mouvement de terrain.

La cartographie comprend un report à l'échelle 1/5000 des cavités connues ou suspectées à la date de la publication de ce plan. La cartographie est réalisée à partir de l'étude des données disponibles à ce jour, notamment toutes les nouvelles données depuis 2017.

La carte suivante a été établie :

➔ à l'échelle 1/5000 : carte des aléa liés à la présence d'anciennes carrières à Pantin

Le PPR carrières, une fois approuvé, sera tenu à la disposition du public en préfecture et en mairie. Il sera annexé in extenso aux documents d'urbanisme en vigueur (PLU), et vaudra

alors servitude d'utilité publique. Le présent document sera consultable en mairie et à la DRIEAT mais ne sera pas intégré aux dits documents d'urbanisme.

## 1. Présentation

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

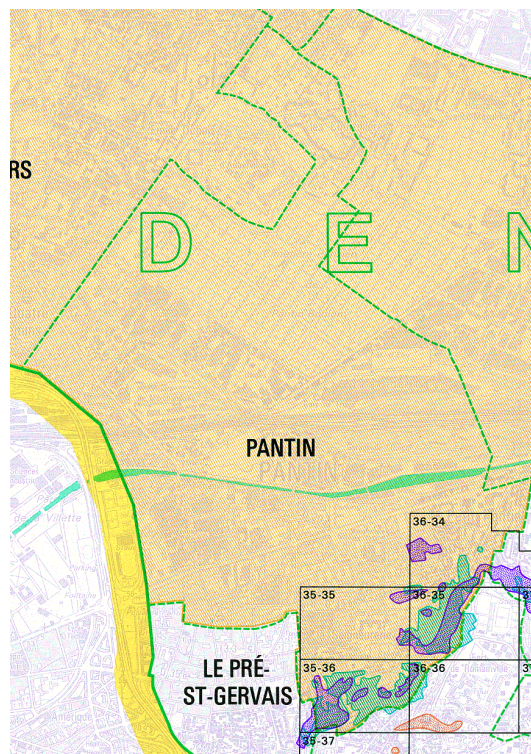
- la carte géologique au 1/20 000 de l'Inspection générale des carrières, quart Nord-Est ;
- la carte géologique « minute » au 1/5000 existant à l'IGC et comportant des points de sondages avec des coupes résumées ;
- les cartes des carrières de l'atlas au 1/1000 réalisées initialement soit à partir des plans fournis par les carriers ou autres mais non vérifiés par l'IGC (délimitations en pointillés) soit à partir de ceux dessinés sur la base des relevés topographiques directement mesurés 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.

La DRIEAT a mené une enquête auprès des divers organismes susceptibles de connaître ou d'archiver des informations géologiques et géotechniques pour la première version de 2017.

Dans le cadre des conventions passées avec le Conseil Départemental de la Seine-Saint-Denis et la commune de Pantin, la Ville de Paris, représentée par l'Inspection générale des Carrières, peut procéder à des visites de contrôle sous le domaine public. Toutefois, les carrières de Pantin 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. Cependant, dans l'hypothèse de la mise en place de puits de service donnant accès aux carrières souterraines de Pantin, l'Inspection Générale des Carrières serait à même d'effectuer des visites d'inspection permettant de reconnaître dans un premier temps puis de surveiller leur état.

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 Pantin. L'analyse de ces données a permis de mettre en évidence les critères d'existence des cavités liées aux carrières à ciel ouvert ou souterraines, ainsi que les facteurs entraînant leur dégradation ou leur remontée plus ou moins rapide, sous forme de fontis, vers la surface.



**Figure 1 : Extrait du tableau d'assemblage des cartes de carrières de l'IGC**

La Ville de Pantin a fait réaliser une campagne de 140 sondages sur les parties communales et certains propriétaires privés ont participé à cette étude sur leur terrain. Ces données ont permis de confirmer le remplissage partiel des carrières souterraines de Haute Masse. Pour les carrières souterraines de 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> Masses le doute persiste, voire même les vides et/ou effondrements ont été confirmés.

La cartographie des aléas comprend un report au 1/5000 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. L'analyse critique de ces données permet de définir les niveaux d'aléas et d'établir la carte correspondante.

On déplore toujours une absence d'informations pour certaines parties de carrières souterraines dont l'existence est fortement présumée. En ce cas, il n'existe pas de cartes de carrières permettant de les localiser précisément et de pouvoir informer le public. De la même manière, les limites d'exploitation des carrières à ciel ouvert peuvent être mal définies. Dans ce cas cette carte d'aléa incorpore cette incertitude. Il est à noter également un décalage entre les cartes de carrières et la réalité des sondages. Il semble que les plans qui ont servi à l'élaboration des cartes ne soient pas toujours les derniers de l'exploitation.

La dissolution peut affecter les Masses et Marnes du Gypse ludien. Il n'existe toutefois pas de facteur « naturel » déclenchant ce phénomène à Pantin ; l'ensemble de commune est concernée par la présence de gypse ludien, mais celui-ci se dégrade principalement à la faveur de circulations anthropiques (fuites de réseaux notamment) et naturelles par les effondrements de carrières. Cet aléa ne justifie donc pas de cartographie à part entière. Les mouvements de terrains liés à la dissolution du gypse ante-ludien, présents sur l'ensemble du territoire de Pantin, ont été exclus par l'Etat de la présente étude d'aléas.



## 2. Analyse des données

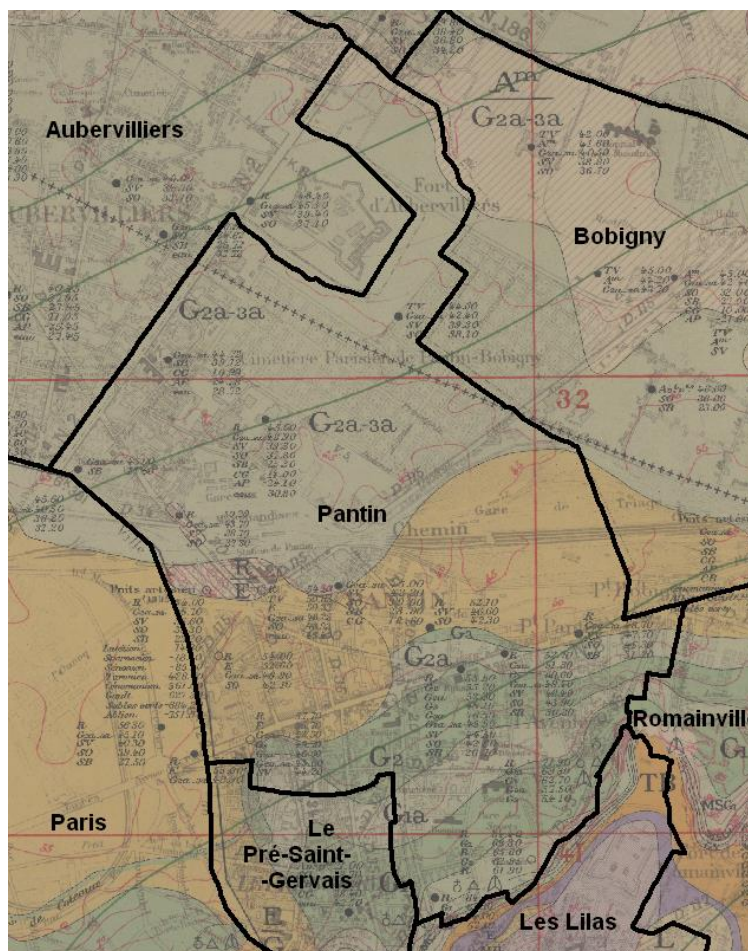
### 2. 1. Géologie de Pantin appliquée aux risques

La commune de Pantin peut être divisée en deux ensembles topographiques principaux : la partie sud-est, structurée par le versant nord de la Butte de Romainville, et le nord, et la plaine située au nord du canal de l'Ourcq.

La Butte de Romainville est une butte témoin laissant affleurer successivement les différents horizons s'étageant du Marinésien (4<sup>e</sup> masse du gypse) au Sannoisien (Glaises Vertes).

**Figure 2 : Extrait de la carte géologique réalisée au 1/20000 – quart Nord Est de Paris**

R : remblais ; TV : terres végétales ; E : formations de pente ; TB : Travertins de Brie ; GV : Glaises vertes ; MC : marnes à Cyrènes ; MSG : marnes supra-gypseuses ; G(1) : masse du gypse (1<sup>ère</sup> masse) ; SO : marno calcaire de Saint Ouen ; SB : Sables de Beauchamp ; M et C : Marnes et Caillasses du Lutétien ; CG : Calcaire Grossier ; AP : Argile Plastique



À Pantin, on recense des exploitations de gypse ludien de 1<sup>e</sup>, 2<sup>e</sup> et de 3<sup>e</sup> masse. Elles sont situées sur le flanc de la butte de Romainville, au Sud de la commune et jusqu'aux limites de Romainville, des Lilas et du Pré-Saint-Gervais.

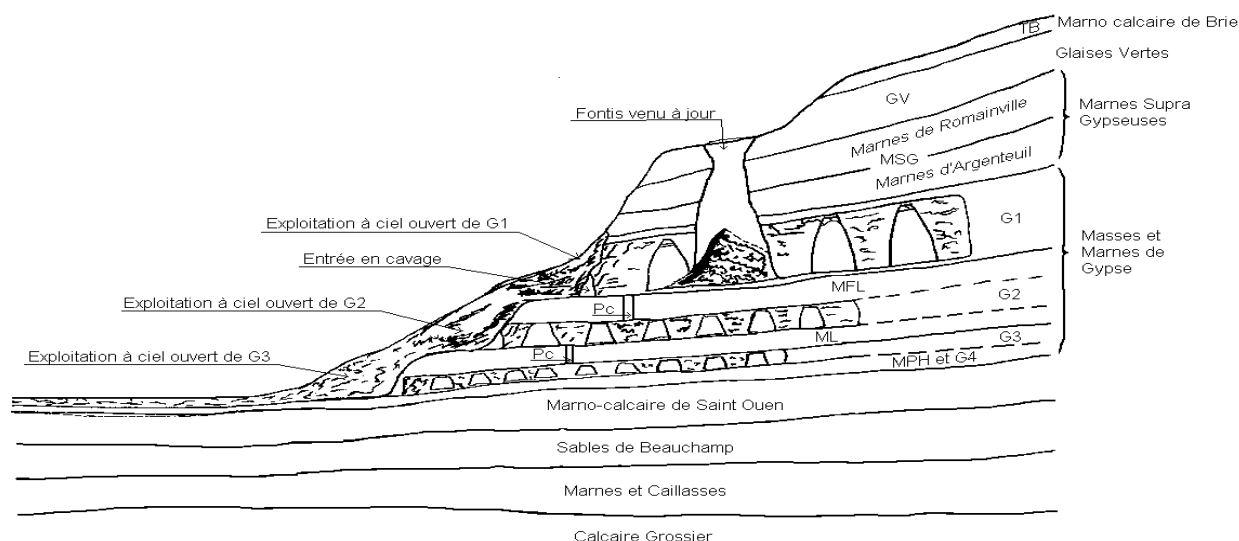
La série ludienne repose sur un ensemble marinésien composé de Marno calcaires (de Saint-Ouen) et de sables (de Beauchamp) recouvrant des Marnes et Caillasses lutétiennes. Ces différents horizons ne se rencontrent pas à l'affleurement à Pantin car ils sont relativement profonds, mais sont atteints par certains sondages dans la plaine, au pied de la butte de Romainville. Ces formations sous-jacentes au Ludien peuvent contenir des bancs lenticulaires de gypse dit « ante-ludiens », qui peut se dissoudre lors des circulations d'eau et des mouvements des nappes souterraines.

Les bancs les plus massifs sont rencontrés dans les Marnes et Caillasses Lutétiennes, mais le Calcaire de Saint-Ouen, plus proche de la surface, est également le siège d'une karstification accidentogène. Le gypse peut également être présent dans les sables de Beauchamp, mais de manière plus anecdotique et très généralement sans conséquences en termes d'aléa.

Le Ludien et le sommet du Marinésien sont relativement homogènes dans les dépôts sédimentaires. Ils se composent de quatre assises ou masses de gypse et de 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 exploités pour la production de plâtre : la première masse (ou « Haute Masse »), les deuxième et troisième Masses. Ces bancs de gypse sont séparés par des ensembles 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. Les horizons sous-jacents de la quatrième masse du gypse et des Marnes infra-gypseuses, bien qu'appartenant au marinésien et donc exclues du Ludien au sens géologique, ont été comprises dans les « masses et marnes de gypse » dans le cadre de cette étude puisque leurs conséquences sur l'aléa est similaire.

La coupe schématique suivante donne la succession des terrains de recouvrement et les supports des gisements.



**Figure 3 : Coupe schématique des terrains**

Les Marnes Supra Gypseuses recouvrent le haut des plateaux. Se situent en tête les Marnes dites « de Pantin » qui sont des marnes calcaireuses 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 les Glaises Vertes, un horizon imperméable sur lequel se concentrent les eaux d'infiltration.

Ces terrains, déposés horizontalement au long du tertiaire, ont été largement érodés et remaniés au quaternaire, pour former une plaine où affleure la base des Masses et Marnes du gypse (3<sup>e</sup> Masse, 4<sup>e</sup> Masse et Marnes infra-gypseuses), recouvertes par un faciès d'altération aux propriétés mécaniques médiocres, par des colluvions de versant et des remblais urbains. Ces horizons sont sensibles aux circulations d'eau, qui peuvent provoquer des désordres par affouillement.

Cette plaine s'étend jusqu'au versant nord-ouest de la Butte de Romainville, au sud de Pantin, qui constitue une butte témoin composée des Masses et Marnes du Gypse, des Marnes Supra-Gypseuses et des Glaises Vertes. Le versant ainsi formé est abrupt et a déjà fait l'objet de glissement et de travaux de stabilisation. La présence massive de remblais hétérogènes de mauvaise qualité en accentue encore la fragilité.

## **2. 2. Conséquence de l'hydrogéologie sur les carrières et la dissolution**

Les eaux naturelles constituent un facteur déclencheur ou aggravant des risques de mouvements de terrain. 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.

La présence d'une nappe perchée contenue par les aquifères sus-jacents aux Glaises Vertes, essentiellement dans le Calcaire de Brie, mais aussi dans les Sables de Fontainebleau dans une moindre mesure, peut avoir un impact sur la stabilité des carrières souterraines et à ciel ouvert situées sur le flanc du versant. En effet, cette nappe, alimentée par les précipitations, peut s'écouler le long des versants de la butte des Lilas-Romainville, fragiliser le ciel des galeries souterraines et lessiver les remblais de ciel ouvert.

Il existe également un écran imperméable constitué dans les Sables de Beauchamp, qui soutient la nappe du Bartonien. Cette dernière baigne la partie supérieure des sables et atteint le Calcaire de Saint-Ouen, gypsifère, pouvant provoquer la formation de poches de dissolution.

Il est important de souligner que le Gypse n'est soluble que dans les eaux non saturées ; le renouvellement de l'eau est donc un facteur déterminant dans le phénomène de dissolution.

## **2. 3. Exploitations des matériaux et dissolutions**

Les cavités susceptibles d'entraîner des désordres en surface, sur le territoire de Pantin concernent essentiellement le gypse, qu'il s'agisse de cavités anthropiques (carrières) ou naturelles (dissolutions karstiques).

D'autres couches géologiques, telles les Glaises Vertes et les Marnes Supra-gypseuses, ont pu être extraites à ciel ouvert lors de la découverte du gypse.

### **2. 3. 1. Matériaux exploités et taux de défrètement**

L'activité de la majorité des carrières a cessé dans la seconde moitié du 19<sup>e</sup> 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 en 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, lorsque le matériau affleure directement ou lorsque le recouvrement le permet (faible profondeur), est l'exploitation **à ciel ouvert**. La carrière est alors ouverte directement à flanc de coteau, en rognant sur la falaise. Il arrive que cette méthode soit aussi utilisée lors d'une reprise d'exploitation (dépilage).

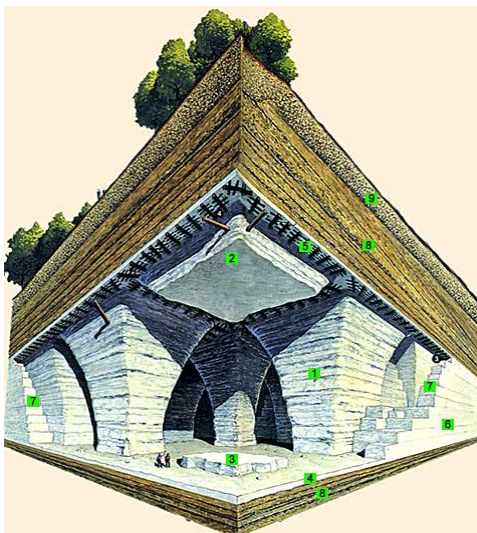
Pour le gypse ludien, cette méthode a pu être utilisée en association avec d'autres exploitations (extraction des Glaises Vertes et/ou Marnes supra gypseuses comprises dans le recouvrement), et s'arrêtait pour passer en souterrain quand le recouvrement devenait trop important ou que la surface était déjà occupée (terres agricoles, ouvrages bâtis ...).



**Photo 1 : Maquette de l'Inspection générale des carrières montrant une carrière de gypse ludien à ciel ouvert et souterraine**

Les hauteurs d'exploitation étaient très variables. Les vides créés ont presque toujours été comblés à l'aide de remblais divers (déblais, terres stériles du recouvrement... mais aussi avec des gravats, bois, briques ...), ayant des qualités mécaniques variables, souvent plus réduites que le matériau d'origine. En plus d'une grande hétérogénéité de nature et de propriétés (perméabilité, compacité, teneur en argiles et donc susceptibilité au retrait-gonflement ...), les remblais ont une épaisseur qui varie de 3 à plus de 35 mètres.

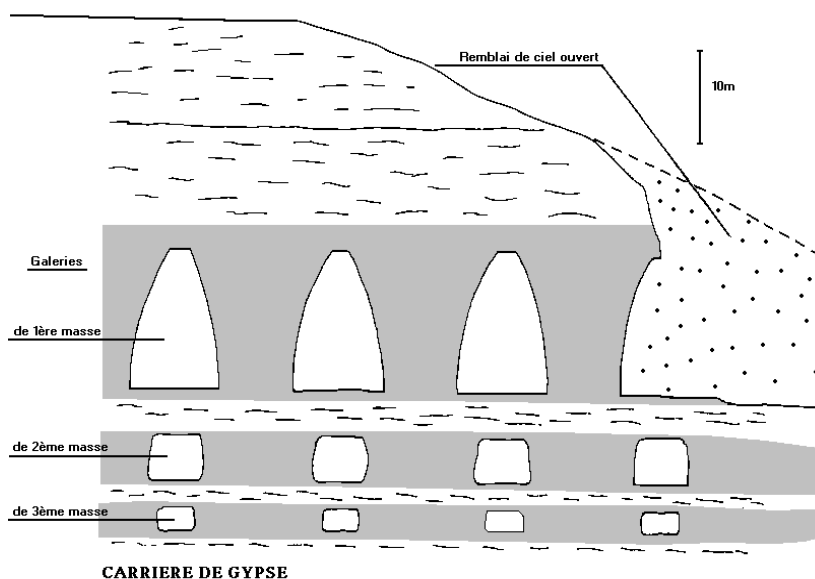
Le recouvrement augmentant, les carriers ont extrait le gypse en souterrain sur 3 niveaux. La Haute Masse (ou première Masse) a été exploitée intensément sur des hauteurs pouvant dépasser 13 mètres à Pantin. Les deuxième et troisième masses, moins puissantes, ont été également exploitées sur des hauteurs oscillant entre 2m et 5m par la méthode dite « des piliers tournés ». Cette technique consistait à extraire la pierre en laissant régulièrement du matériau en place pour constituer des piliers naturels. Cette méthode permet d'obtenir des salles d'exploitations assez hautes et de ne pas remblayer la carrière derrière soi.



**Photo 2 : Schéma d'une carrière souterraine exploitée par la méthode des piliers tournés dans le gypse ludien**

1, 2 et 3 : pilier tourné ; 4 : pied de carrière ; 5 : toit de carrière ; 6 et 7 : masse en place ; 8 et 9 : recouvrement

**Figure 4 : Schéma d'une carrière à ciel ouvert remblayée, masquant une entrée en cavage et sous minées par d'autres carrières souterraines**



L'examen des plans et des archives a révélé que l'exploitation en souterrain du gypse a été conduite exclusivement par cette méthode, avec un taux de défrètement (rapport entre la surface des vides et la surface totale de l'exploitation à 1 mètre du pied de carrière) moyen de 65%, ce pourcentage a pu être poussé à 70%, ce qui explique en partie les nombreux effondrements pendant l'exploitation ou juste après.

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<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> Masses), large à la base et étroite

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

Les terrains situés au-dessus des masses exploitées sont de nature marneuse à argileuse ; et ont pu localement faire l'objet d'un décapage. Ainsi la protection naturelle contre les venues d'eau a été localement retirée. La superposition de plusieurs niveaux accélère l'apparition des fontis (Cf. partie 3.1.1) et accentue leur diamètre.

En fin d'exploitation, la carrière était abandonnée le plus souvent sans remblayage ou avec un remblayage très partiel, laissant subsister des vides résiduels importants. Ces carrières sont actuellement inaccessibles et peut-être en très mauvais état de conservation. Aucune confortation spéciale n'a été répertoriée sur les plans des exploitants et n'a donc été reportée sur les cartes au 1/1000 de l'Inspection générale des carrières. Dans l'hypothèse de la mise en place de puits de service donnant accès aux carrières souterraines de Pantin, l'Inspection Générale des Carrières effectuerait des visites d'inspection permettant de surveiller leur état.

A Pantin, la pente du versant est assez forte, des glissements de terrain ont également eu lieu, modifiant ainsi les déversements de la nappe perchée de la butte et les circulations sur le versant. Des incidents type fontis sont apparus pendant le XIX<sup>ème</sup> siècle, incitant au remplissage de certaines carrières, notamment celles de Haute Masse sur la partie la plus abrupte du versant.

### **2. 3. 2. Dissolutions de gypse**

Le gypse est un minéral soluble : en présence d'eau non saturée (donc nécessairement renouvelée par une circulation), des cavités karstiques peuvent se développer dans des proportions suffisantes pour générer un aléa significatif en cas d'effondrement. Contrairement aux carrières, qui sont historiquement connues et souvent cartographiées, les karsts gypseux sont aveugles et peuvent être évolutifs ; on ne les découvre qu'à la faveur de sondages de reconnaissance ou à la suite d'incidents. Des méthodes moins ponctuelles de détection, par géophysique notamment, existent mais sont très difficilement applicables dans un milieu densément urbanisé comme Pantin.

#### **a) Gypse du Ludien et du Marinésien**

Ce sont ces horizons géologiques qui constituent les Masses et Marnes du Gypse, exploitées à Pantin et dans la région. Les vides existants dans cette formation sont essentiellement dus aux carrières ; toutefois, certains vides ou décompressions dans le gypse ludien ou dans son faciès d'altération peuvent résulter de phénomènes de dissolution et sont susceptibles de provoquer des désordres. Ces cavités sont engendrées par la circulation d'eau dans les fractures du massif, qui érodent les parois et les élargissent par dissolution jusqu'à former de véritables cavités.

À Pantin, la portion de versant sujette à des circulations « naturelles », issues de la nappe soutenue par les Glaises Vertes, est largement exploitée par les carrières, si bien que les infiltrations d'eau constituent un facteur aggravant de l'aléa lié aux carrières, dont elles fragilisent le ciel, plutôt qu'un aléa à part entière. En effet, en zone exploitée, une circulation d'eau aboutira à l'effondrement du ciel de carrière et à la formation d'un fontis de carrière bien avant d'avoir ouvert une cavité susceptible de s'effondrer d'elle-même.

Au pied du versant, dans la plaine, l'aléa de dissolution ludienne / marinésienne existe, mais il n'est pas lié à des dynamiques naturelles, puisqu'aucune nappe ne baigne ces formations, et qu'aucune circulation de versant ne peut alimenter cette dissolution. La dissolution ludienne est ici liée à des apports anthropiques d'eaux issues de fuites ou générés par une mauvaise gestion des eaux pluviales.

Dans les sondages, il n'est pas rare d'observer de fortes décompressions et même des vides. Quand ces parties décomprimées ont une épaisseur proche d'une hauteur d'exploitation, il est difficile de faire la différence entre dissolution et exploitation mal connue. Les conséquences sur la stabilité des terrains sont pratiquement les mêmes. Toutefois, si on peut traiter l'évolution d'un fontis lié à une carrière, il est plus aléatoire de connaître l'extension des cavités ou des réseaux karstiques liée aux dissolutions du gypse.

L'omniprésence de cette problématique à Pantin ne saurait ainsi justifier d'une carte d'aléa à part entière du fait d'une origine anthropique évitable, mais elle encourage à une surveillance régulière des réseaux humides et à une gestion prudente des eaux pluviales.

### **b) Gypse antéludien (Bartonien et Lutétien)**

Pour mémoire, l'aléa lié à la dissolution des gypses anté-ludiens est présent sur l'ensemble de la commune de Pantin, à des degrés divers. Il est généré par la présence de bancs de gypse discontinus, souvent qualifiés de « lenticulaires », présents dans les Marnes et Caillasses (Lutétien supérieur) et dans le Calcaire de Saint-Ouen (Bartonien Moyen), et très occasionnellement dans les Sables de Beauchamp (Bartonien Inférieur).

La seule existence de ces bancs de gypse ne suffit pas à constituer l'aléa : c'est leur dissolution par les nappes bartonienne et lutétienne qui aboutit à la création de vides accidentogènes.

Ces nappes, qui baignent les formations gypsifères, présentent des gradients et des vitesses de circulation variables à l'échelle locale en fonction de la perméabilité des milieux ; cette variabilité implique une hétérogénéité dans les taux de renouvellement et de saturation, et donc « d'agressivité » vis-à-vis du gypse.. En revanche, L'Inspection générale des carrières dispose du recensement des incidents dont elle a été informée, et en l'enrichissant des nombreux sondages portés à sa connaissance notamment dans le cadre de l'instruction d'autorisations d'urbanisme, il est possible de dégager des zones plus particulièrement sujettes à la dissolution.





### 3. Description sommaire des désordres

Les désordres de surface sont consécutifs à la présence de vides dans les bancs de gypse et à l'effondrement des terrains sus-jacents ou des remblais de carrières à ciel ouvert et de leurs tassements différentiels.

Ces anomalies peuvent être de deux origines :

- anthropiques, l'homme ayant exploité les bancs de travertin ou de gypse, des marnes et des argiles 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 effondrement successif des terrains qui les recouvrent et provoquer alors, selon la hauteur du recouvrement, soit une cuvette d'affaissement, soit un « trou » vertical appelée "*fontis*". Les affaissements et les fontis sont des phénomènes localisés, d'une forme généralement circulaire et de diamètre variable.

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. Ce cas est heureusement peu probable à Pantin du fait de la configuration des exploitations.

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 des piliers 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.

Enfin, 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.

#### 3. 1. Définition des désordres

Les désordres « mouvement de terrain » sont liés à la présence de vide, franc ou diffus (manque de compacité du sol), qui évoluent vers la surface jusqu'à l'impacter plus ou moins brutalement. Que ces vides soient créés « naturellement » par dissolution du gypse, ou creusés de la main de l'homme (carrières souterraines et remblais de ciel ouvert), ils évoluent inéluctablement vers la surface, sans qu'un facteur déclenchant identifiable ne soit nécessaire.

NB : Les aléas décrits pour les carrières à ciel ouvert ne concernent que celles qui ont été remblayées par les carriers avec des matériaux d'origines diverses et des terrains remaniés laissés sur place, plus particulièrement des stériles contenant encore du gypse.

### 3.1.1 Aléas liés à la remontée à la surface des désordres dus aux anciennes carrières souterraines et à ciel ouvert et aux karsts.

- **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 avant que celle-ci ne rompe, 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 ait le temps d'apparaître et de remonter à la surface. Les terrains continuent à se décompresser tant que le phénomène initiateur n'a pas cessé.

C'est à cette dernière catégorie de remontée de vides que s'apparentent les tassements de remblais de carrière à ciel ouvert avec des vides moins importants et plus diffus sur la hauteur de remblais.

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, et en ce cas un affaissement apparaît.

☞ Sur les bâtiments, ces affaissements déstabilisent les fondations, ce qui se traduit par l'apparition de 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.

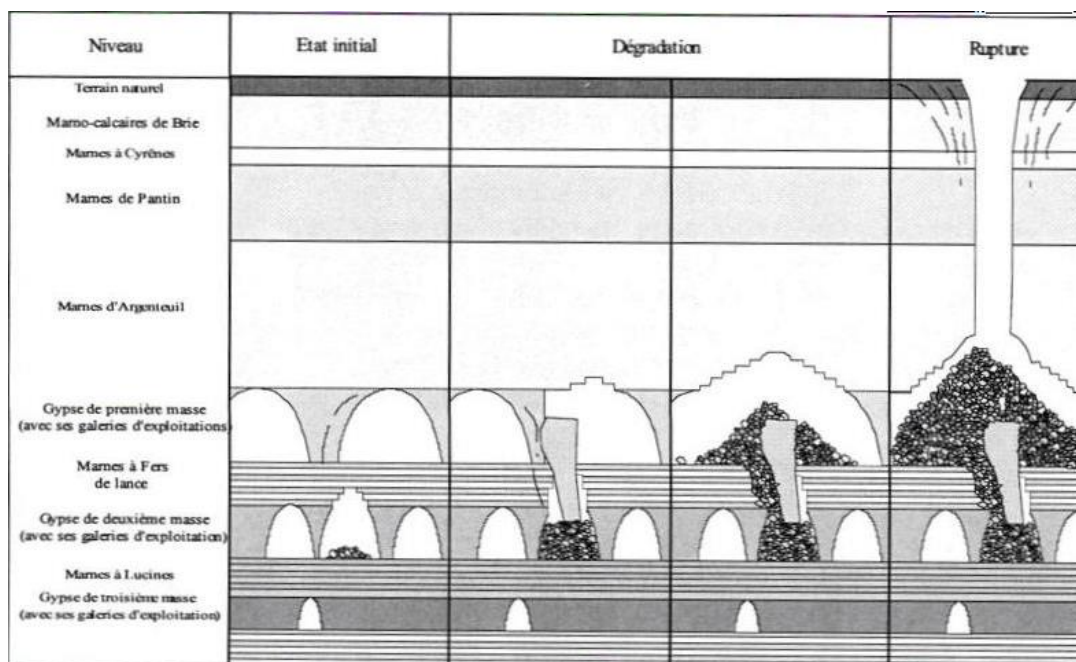
Ils peuvent provoquer par contre des altérations ou des ruptures de canalisations (eaux, égouts, gaz, ...). Les fuites de ces canalisations engendrées par un affaissement peuvent avoir des conséquences non négligeables sur l'évolution à court terme du désordre, l'eau accélérant d'autant plus le tassement du sol

- **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", qui évolue progressivement jusqu'à la surface pour laisser apparaître un

large « trou » aux parois abruptes. Le risque de fontis est largement présent à Pantin, et de nombreux exemples sont à déplorer.



**Photo 3 : Exemple d'un fontis de carrière de gypse de 1ere masse à Pantin (2016)**



**Figure 5 : mécanisme de venue à jour d'un fontis dans le cas d'une superposition d'étage**

Dans les carrières, les fontis se forment préférentiellement dans les zones où l'espace entre les piliers est trop important, ce qui induit un effort de traction trop important sur les bancs du ciel déjà souvent fracturés. 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.

La superposition de plusieurs niveaux accélère l'apparition des fontis et accentue leur diamètre. Le décapage des couches argileuses sus-jacentes réduit la protection naturelle des niveaux gypseux contre l'eau, et accélère le vieillissement « normal » de la cavité.

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.

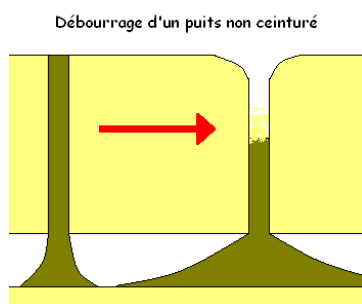
☞ Sur les bâtiments, l'apparition d'un fontis se traduit par la perte de sol de fondation. Si le bâtiment n'a pas de structure rigide des fondations, les murs porteurs cassent entraînant la ruine de tout ou partie du bâti, en fonction de la taille du fontis et du point de survenance du phénomène. Les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

- **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  $L/H > 1$ . La présence de ce type d'effondrement reste peu probable, du fait de la géométrie et de la résistance des piliers de Gypse.

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

### • Les déboussages de puits

Les anciens puits de service ou d'extraction n'ont pas toujours été comblés de manière satisfaisante, et ne sont pas nécessairement ceinturés à leur base. Des infiltrations d'eau peuvent provoquer un tassement des remblais, et des boues peuvent se répandre dans les anciennes galeries, provoquant un déboussage. Ce phénomène aboutit au dégagement de l'ancienne tête du puits, provoquant en surface un trou de diamètre au moins égal à celui du puits initial (de 1,20m à 5m environ).



### **3 1 2 Les glissements de terrain liés aux carrières**

Des risques significatifs de mouvements de sol peuvent être engendrés par l'exploitation des carrières à ciel ouvert de gypse ludien, qui a généré l'existence de falaises, et par la mauvaise qualité des remblais qui ont été utilisés pour les combler.

Des talus de déblais trop raides, parfois situés au-dessus des fronts de taille, ou des mises en dépôt anarchiques de stériles, accompagnés de terrains de recouvrement déstructurés et argileux, peuvent être à l'origine de glissements de terrain répétitifs.

En bordure de versant, à proximité des entrées en cavage ou des talus, il est fréquent de rencontrer des diaclases ouvertes dans les premiers mètres de l'exploitation. S'ajoutent à ces diaclases, un ripage et une dissolution des bancs de gypse, provoquant des effondrements de ces entrées, dans les remblais.

Ces mouvements de terrain sont traités dans d'autres rapports concernant le Plan de Prévention Mouvement de Terrain : phénomènes de glissements de talus, éboulements, solifluxion, instabilités de falaises, retrait – gonflement des argiles, ....

### **3 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 :

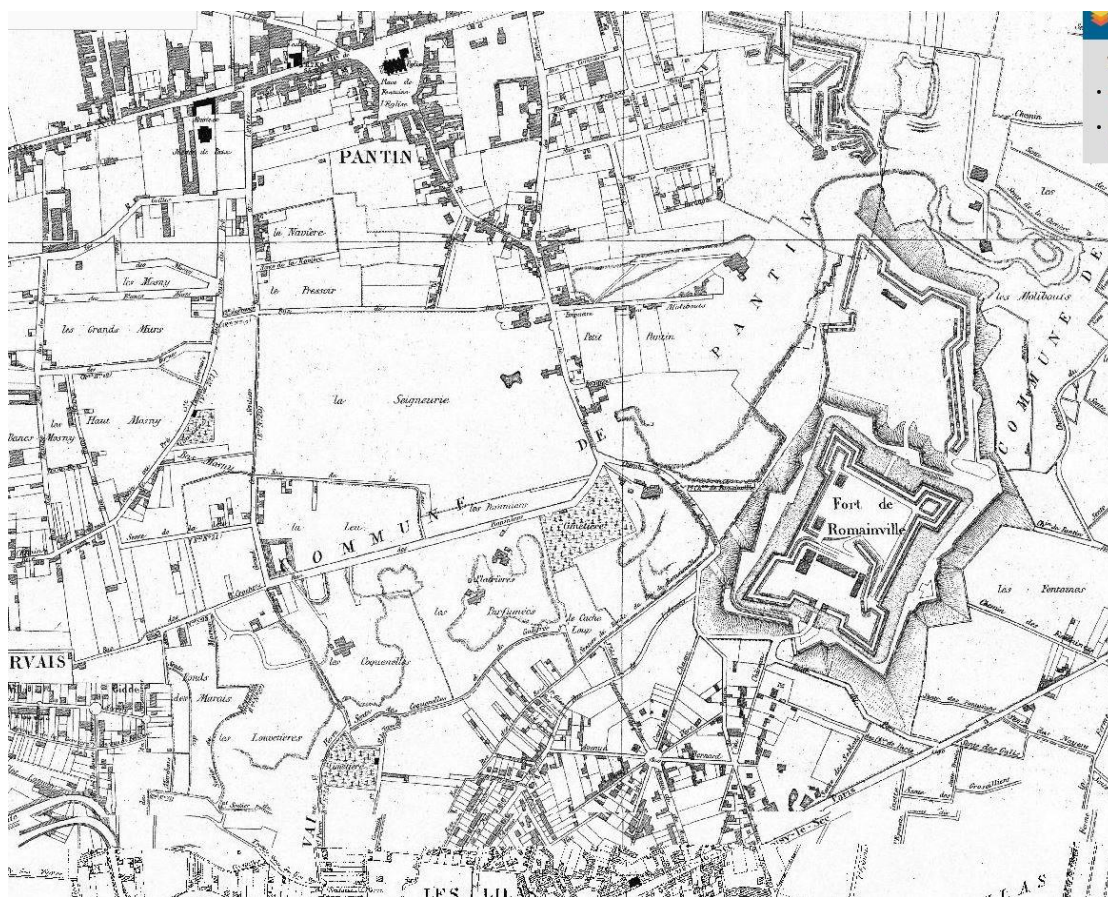
- ✗ Les zones où des éboulements se sont produits, présentent de fortes probabilités d'infiltrations d'eau.
- ✗ Les zones où des exploitations à ciel ouvert ont été exploitées puis remblayées avec des matériaux perméables ou gypseux, présentent de fortes probabilités d'infiltrations d'eau.
- ✗ La présence 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, les anciens réseaux en grès cassés ou abandonnés, 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, voire les piliers tournés.

## 4. Aperçu historique des carrières à Pantin

Le bassin carrier gypsifère de la Butte de Romainville, à Pantin et dans ses environs, est tout particulièrement ancien et mal connu. En particulier, il est attesté qu'il était déjà exploité dans la seconde moitié du XVI<sup>e</sup> siècle pour la production de plâtre. Il est possible que les premières extractions soient antérieures, le gypse de la région parisienne étant exploité depuis l'antiquité, mais nous ne disposons d'aucune source attestant de la présence de carrières avant le XVI<sup>e</sup> siècle. L'abondance de cette ressource, sa disponibilité et sa position stratégique dans le contexte francilien a favorisé l'essor des exploitations avec l'accroissement de la demande liée à l'avènement de l'ère industrielle. L'importance de cette ressource pour la communauté est illustrée par le fait qu'en 1801, 47 des 212 pantinois disposant du droit de vote sont carriers et plâtriers. Avant d'être assimilée à un risque, la présence de gypse a donc largement participé au développement et à l'identité de Pantin.

Les premières phases d'exploitation du gypse se sont vraisemblablement déroulées à ciel ouvert, la ressource étant directement disponible sur le flanc du coteau ; puis les carrières se sont enfoncées en souterrain lorsque le décapage des terres de recouvrement devenait trop fastidieux, ou venaient à menacer la stabilité du versant. On note à ce propos que plusieurs interdictions ont été prononcées au XIX<sup>e</sup> siècle à l'encontre d'exploitants carriers qui rognaien le coteau au-delà des limites qui leur étaient concédées, menaçan les ouvrages publics dominant la falaise ainsi créée (chemins communaux, aménagements hydrauliques de drainage de la nappe des Glaises Vertes, dite des « sources de Romainville » notamment).



**Figure 6 : Extrait de l'Atlas Départemental de la Seine de 1874 (révision)**

De nombreux accidents ont été déplorés durant les phases d'exploitation : plusieurs fontis issus des carrières souterraines sont venus à jour dans la seconde moitié du XIXe siècle ; on pourra citer en exemple l'accident du 5 septembre 1874, qui a enseveli et tué deux personnes.

Des autorisations d'exploiter sont régulièrement accordées jusqu'en 1890 ; plusieurs de ces autorisations aboutissent à des démêlés judiciaires liées entre autres au non-respect des limites, ce qui peut expliquer en partie les incertitudes de l'Atlas de l'IGC quant aux positions des fronts de taille et de cavages non répertoriés beaucoup de limites de front de taille sont datés afin de contrôler la version des plans).

L'exploitation des carrières à Pantin est arrêtée à la fin du XIXe siècle, puis une campagne de remblaiement par décharge est entamée localement en 1899 par un promoteur privé. Des éboulements et glissements de terrain sont régulièrement provoqués par les trop fortes pentes du talus artificiel et la médiocre qualité des remblais employés. Ces remblais sont aujourd'hui encore à l'origine de nombreux désordres endogènes ou favorisés par des circulations d'eau. En ce qui concerne les remblais, beaucoup d'incertitudes demeurent sur leurs localisations et leur mise en place.



## 5. Méthodologie : étude et répartition des aléas à Pantin

Dans le cas des anciennes carrières, l'aléa se définit en fonction de sa probabilité d'occurrence et de son impact sur les personnes et les biens. Contrairement à d'autres types d'aléas qui sont confrontés à une périodicité de retour, les principaux aléas de carrière, tels le fontis et l'effondrement généralisé, ne se produisent a priori qu'une fois. S'il revient ce sera avec une intensité moindre.

L'intensité de l'aléa se définit en fonction des dégâts produits : blessures ou risque d'atteinte à la vie des personnes, fissurations plus ou moins importantes du bâti, voire mise en péril ou ruine des fondations ou de la structure.

### 5 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 (1/5000), on admettra que toutes les cavités sont semblables : leur taux de défrètement moyen avoisine 65 %, en moyenne, et les épaisseurs résiduelles de gypse au toit et au mur n'excèdent pas 1 mètre. Toutefois à Pantin certaines carrières souterraines notamment de 2<sup>ème</sup> Masse ont été plus fortement exploitées.

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 important.

À titre d'exemple, des piliers sous-dimensionnés par rapport au poids des terrains de recouvrement (critère géométrique), vont entraîner une fissuration progressive des piliers, du toit et du sol de la carrière (critère géotechnique), pouvant aboutir dans un cas défavorable à la rupture des piliers et à un effondrement (fontis voire effondrement plus important) en surface. Il convient de noter que cela n'est heureusement pas le mécanisme principal d'effondrement dans les carrières de gypse de Pantin, les effondrements y survenant plus souvent par rupture du toit de la carrière évoluant en fontis. Toutefois il est à noter que la 2<sup>ème</sup> Masse à Pantin a subi des effondrements de toit, les Marnes à Fer de Lance n'étant pas très résistantes en ciel de carrière et la 2<sup>ème</sup> Masse ayant été parfois très fortement exploitée.

De la même manière, une géométrie d'exploitation irrégulière, ou la présence de plusieurs étages dont les piliers ne seraient pas superposés, ceux de l'étage supérieur portant à faux sur les vides de l'étage inférieur (critères géométriques) vont entraîner une concentration des contraintes dues aux poids des terrains de recouvrement et une

fissuration des toits, sols et piliers où les contraintes sont concentrées (critère géotechnique), pouvant là encore aboutir à une rupture et à un effondrement. Il est très fréquent à Pantin que ce soit le cas entre la 2<sup>ème</sup> et la 3<sup>ème</sup> Masses et parfois entre la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> Masses.

#### ♦ **Le contexte géologique et hydrogéologique de l'environnement**

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

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

- si la carrière est à faible profondeur ou sous des horizons géologiques aux qualités géotechniques médiocres ;
- si le front de taille est peu protégé par des couches argileuses imperméables ;
- si 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 3.2. 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 dégradation des carrières.

Pour une carrière souterraine de gypse par exemple, les couches imperméables des terrains de recouvrement la protégeront de l'altération des eaux météoriques, mais la présence de nombreux fontis peut annihiler localement cette protection en favorisant des infiltrations des nappes sus-jacentes vers la carrière.

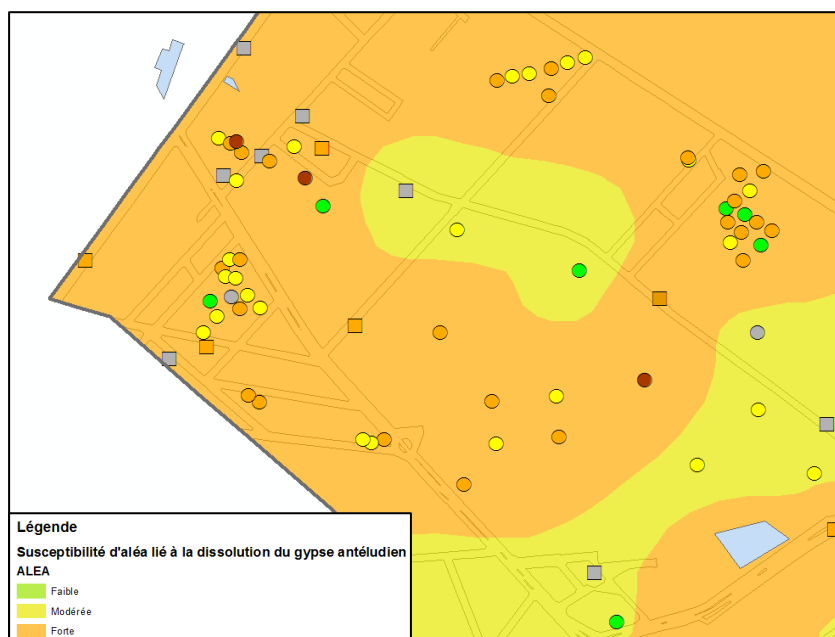
Sur ces bases, on peut considérer que les risques de fontis et/ou d'affaissement sont très élevés sur toutes les zones concernées par les anciennes carrières souterraines vides ou partiellement remblayées.

### **5.2. - Caractérisation et cartographie de l'aléa lié à la dissolution du gypse antéludien**

Cette partie, ne faisant plus partie de la mission confiée à l'IGC, reste en carte informative le temps qu'elle soit reprise par un autre expert pour le compte de la DRIEAT. La carte de 2017 n'a pas été modifiée.

La cartographie proposée ici est donc empirique, issue de l'utilisation de données ponctuelles dont les caractéristiques ont été extrapolées pour former des zones d'aléa homogènes.

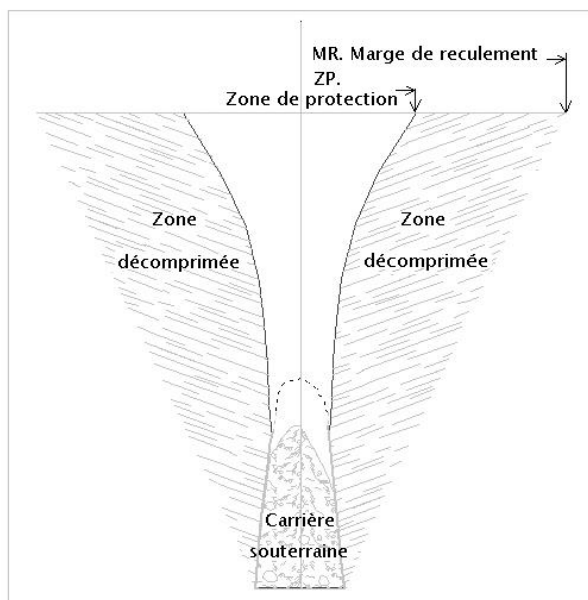
### **Figure 7: Méthodologie de la cartographie de l'aléa lié à la dissolution du gypse antéludien**



### 5 3. - Caractérisation et cartographie de l'aléa pour les carrières

Nous avons retenu quatre niveaux d'aléas (très fort, fort, modéré, 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).



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, les terrains décompressés et les fontis ont été traités par injection sous pression.

Une carrière vide est une carrière entièrement vide ou avec des vides métriques

**Figure 8 : Schéma zone de protection - marge de reculement**

### 5.3.1. Zones de protection et marge de reculement

#### Zone de protection (ZP)

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 à partir d'une carrière souterraine (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 des connaissances de l'IGC et d'une estimation du diamètre des fontis formés en surface, dans des conditions similaires d'exploitation, sa largeur est fixée à :

- ZP = 0 mètre si la carrière souterraine de gypse est consolidée ou devant des entrées en cavage sans niveau souterrain en-dessous ou pour une carrière à ciel ouvert ;
- ZP = 2m dans le cas d'une carrière souterraine de gypse de 3<sup>ème</sup> Masse seule, vide ou remblayée, ou dans le cas d'une carrière souterraine de gypse de 2<sup>ème</sup> Masse remblayée ;
- ZP = 4m dans le cas d'une carrière souterraine seule et remblayée de 1<sup>ère</sup> Masse ou seule et vide de 2<sup>ème</sup> Masse, ou dans le cas de carrières souterraines superposées de 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> Masses
- ZP = 8 mètres dans le cas d'une carrière souterraine de gypse seule de 1<sup>ère</sup> Masse vide ou à vides métriques, ou d'une carrière souterraine de gypse de 1<sup>ère</sup> Masse remblayée au-dessus d'une autre carrière souterraine de gypse;
- ZP = 16 mètres dans le cas de carrières de gypse sur plusieurs étages vides dont la 1<sup>ère</sup> Masse

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

#### Marge de reculement (MR)

La marge de reculement représente la zone d'influence d'un événement 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 au double de la zone de protection en raison des trop grandes variations de matériaux selon les endroits, soit :

- MR = 0 mètre si la carrière souterraine de gypse est consolidée ou devant des entrées en cavage sans niveau souterrain en-dessous ou pour une carrière à ciel ouvert ;
- MR = 4m dans le cas d'une carrière souterraine seule de gypse de 3<sup>ème</sup> Masse vide ou remblayée ou dans le cas d'une carrière souterraine de gypse de 2<sup>ème</sup> Masse remblayée ou encore dans le cas de carrières à ciel ouvert de 2<sup>ème</sup> ou 3<sup>ème</sup> Masses ;
- MR = 8m dans le cas d'une carrière souterraine seule et remblayée de 1<sup>ère</sup> Masse ou seule et vide de 2<sup>ème</sup> Masse, ou dans le cas de carrières souterraines superposées de 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> Masses ou encore d'une carrière à ciel ouvert de 1<sup>ère</sup> Masse ;

- MR = 16 mètres dans le cas d'une carrière souterraine de gypse seule de 1<sup>ère</sup> Masse vide ou à vides métriques, ou d'une carrière souterraine de gypse de 1<sup>ère</sup> Masse remblayée au-dessus d'une autre carrière souterraine de gypse;
- MR = 32 mètres dans le cas de carrières de gypse sur plusieurs étages vides dont la 1<sup>ère</sup> Masse

**Tableau 1 : Tableau récapitulatif des zones de protection et des marges de reculement**

	0 m	2m	4m	8m	16m	32m
<b>ZP</b>	Carrières consolidées, devant entrée en cavage, carrières à ciel ouvert	Carrière de 3 <sup>ème</sup> masse, ou de 2 <sup>ème</sup> masse remblayée	Carrière de 2 <sup>ème</sup> masse vide ou de 1 <sup>ère</sup> masse remblayée, ou carrières superposées de 2 <sup>ème</sup> et 3 <sup>ème</sup> masse c	Carrière de 1 <sup>ère</sup> masse vide ou superposition de carrières remblayées de 1 <sup>ère</sup> masse avec d'autres masses remblayées	carrières vides de gypse sur plusieurs étages, dont la Haute Masse	-
<b>MR</b>	Carrières consolidées, devant entrées en cavage	-	Carrière de 3 <sup>ème</sup> masse, ou de 2 <sup>ème</sup> masse remblayée, carrières à ciel ouvert de 2 <sup>ème</sup> et 3 <sup>ème</sup> Masses	Carrière de 2 <sup>ème</sup> masse vide ou de 1 <sup>ère</sup> masse remblayée, ou carrières superposées de 2 <sup>ème</sup> et 3 <sup>ème</sup> masse, carrière à ciel ouvert de 1 <sup>ère</sup> Masse	Carrière de 1 <sup>ère</sup> masse vide ou superposition de carrières remblayées de 1 <sup>ère</sup> masse avec d'autres masses remblayées	carrières vides de gypse sur plusieurs étages, dont la Haute Masse

### 5.3.2. Détail des aléas

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

**Tableau 2 : Trois niveaux d'aléas pour les carrières à ciel ouvert**

Matériaux	Gypse ludien		Marnes supra gypseuses	
	Avérées	Supposées	Avérées	Supposées
Aléa	Fort	Modéré à faible	Modéré	Faible

Tableau 3 : Quatre niveaux d'aléas pour les carrières souterraines

cas	Gypse	
	<i>Sous faible recouvrement</i>	<i>Protection par gypse en place non exploité</i>
<b>Fontis repéré non apparu en surface</b>	<i>Très fort</i>	<i>Très fort à fort</i>
<b>Galeries vides ou partiellement remblayées d'origine</b>	<i>Très fort</i>	<i>Fort</i>
<b>Galeries « remblayées »</b>	<i>Fort</i>	<i>Modéré</i>
<b>Galeries « remblayées » clavées</b>	<i>Modéré</i>	<i>Faible</i>
<b>Galeries « consolidées »</b>	<i>Faible</i>	<i>Faible</i>
<b>Exploitation souterraine présumée</b>	<i>Fort ou modéré (en fonction du remplissage supposé)</i>	<i>Modéré</i>
<b>Puits d'accès non ceinturé</b>	<i>Très fort</i>	<i>Très fort</i>

Ces niveaux d'aléas ont été cartographiés à l'échelle 1/5000.

En cas de superposition d'aléas, c'est le plus fort qui est représenté.

Une catégorie spéciale a été ajoutée dans le cas d'exploitations souterraines de 2<sup>ème</sup> ou 3<sup>ème</sup> Masse avec un niveau inexploité au-dessus (forte épaisseur de gypse que la dissolution du gypse n'a pas affecté), en ce cas, l'aléa descend d'une intensité.

Sont classées en **aléa très fort** :

- ✓ Les zones de carrières souterraines de gypse, non « consolidées », non « remblayées », avec fontis repérés ;
- ✓ Les zones de puits d'accès non sécurisées en carrière souterraine non « remblayée » ;
- ✓ Les zones de carrières souterraines de gypse non « consolidées », non « remblayées » avec des galeries vides ou partiellement remblayées d'origine ;
- ✓ Les zones de protection autour des carrières souterraines classées en aléa très fort.

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 fontis venus à jour et remblayés depuis longtemps, non traités par injections ;
- ✓ Les zones de carrières souterraines de gypse non « consolidées », non « remblayées », quand on a une protection par gypse en place non exploité ;

- ✓ Les zones de carrières souterraines « remblayées » de gypse ;
- ✓ Les zones où l'existence de cavités, dans le gypse, est probable (ancien plan, indices en surface, nouveaux sondages...) mais dont les limites n'ont pas été reconnues, et où le risque de fontis et/ou d'affaissement est grand ;
- ✓ Les zones de protection correspondant aux carrières souterraines classées en aléa fort ;
- ✓ Les zones de puits d'accès non ceinturés en carrière dans le cas de carrière de gypse remblayée ;
- ✓ 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 modéré** :

- ✓ Les carrières de gypse à ciel ouvert dont les limites sont mal connues ou « remblayées » sans traitement particulier ;
- ✓ Les carrières de Masses Supra gypseuses à ciel ouvert dont les limites sont connues et n'ayant fait l'objet d'aucun traitement particulier ;
- ✓ Les carrières souterraines de gypse, « remblayées » par remblaiement mécanique ou par injection gravitaire quand on a une protection par gypse en place non exploité ;
- ✓ Les carrières souterraines de gypse, « remblayées » par remblaiement mécanique ou par injection gravitaire, avec clavage, sans traitement des terrains de recouvrement ;
- ✓ Les zones de carrières souterraines de gypse, non « consolidées », non « remblayées » ou non connues, quand on a une protection par gypse en place non exploité ;
- ✓ Les zones de protection correspondant aux carrières souterraines classées en aléa modéré ;
- ✓ Les marges de reculement autour des carrières souterraines classées en aléa fort ;
- ✓ Les zones où l'existence de cavités est probable, mais dont les limites ne sont pas connues, et où le risque de fontis et/ou d'affaissement est faible du fait de la nature du recouvrement.

Sont classées en **aléa faible** :

- ✓ Les carrières de gypse à ciel ouvert dont les limites sont connues et « remblayées » avec traitement particulier ;
- ✓ Les carrières de Masses Supra gypseuses à ciel ouvert dont les limites sont mal connues ;
- ✓ Les carrières souterraines de gypse, remblayées par remblaiement mécanique ou par injection gravitaire, avec clavage, avec traitement des terrains de recouvrement ;
- ✓ Les carrières souterraines de gypse, quand on a une protection par gypse en place non exploité, remblayées par remblaiement mécanique ou par injection gravitaire, avec clavage, avec ou sans traitement des terrains de recouvrement ;
- ✓ Les carrières souterraines « consolidées » ;

- ✓ Les zones de protection correspondant aux carrières souterraines classées en aléa faible, autres que « consolidées » ;
- ✓ Les marges de reculement des zones classées en aléa modéré.

Dans le cas des carrières, un aléa ne disparaît pas, sauf si la carrière a été décapée.

Ces aléas sont indiqués sur la carte des aléas dus aux mouvements de terrain liés aux carrières, au 1/5000 de Pantin par la légende :

- aléa très fort : zone marron
- aléa fort : zone orange
- aléa modéré : zone jaune
- aléa faible : zone verte.

### 5.3.3. Précision utiles à la cartographie de l'aléa carrières

Les principes de la cartographie de l'aléa carrières tiennent en 2 étapes successives :

- ✓ Cartographier une zone avec l'aléa qui correspond au type d'exploitation et aux caractéristiques locales
- ✓ Rechercher toutes les informations possibles afin de faire correspondre le niveau d'aléa avec un des cas explicités dans le paragraphe précédent, en fonction du type d'interventions effectuées après abandon de la carrière.

L'attribution des aléas aux zones de carrières souterraines n'est pas normalisée selon une classification préétablie. Chaque exploitation doit être évaluée d'après ses caractéristiques et selon le contexte environnemental à un instant donné. Il s'agit d'un travail de recherche où la difficulté première est de pouvoir définir des secteurs d'aléa équivalents. De nombreuses interrogations demeurent du fait de l'inaccessibilité de certaines carrières, du manque d'informations et du coût des travaux de reconnaissance.

Pour établir la carte d'aléa, des choix ont été faits, notamment :

- Considérer que les travaux de fondation tels que les pieux sans remplissages préalables n'ont pas valeur de consolidation de la carrière. Ces types de travaux assurent en théorie la sécurité des bâtiments qui sont fondés, mais bien souvent on retrouve le béton des pieux étalés en carrière et des fontis peuvent remonter vers la surface en déstabilisant les pieux. Ces pieux n'équivalent pas à un traitement du terrain, ni à une mise en sécurité de la carrière. Leurs mises en œuvre peuvent même la fragiliser au passage du ciel de carrière qu'ils disloquent. Ils n'autorisent donc pas à réduire le degré d'aléa susceptible de toucher une construction future ou les espaces situés entre les bâtiments fondés. C'est pourquoi, les travaux de consolidation effectués uniquement par fondation profondes sans remplissage préalable des carrières souterraines ne sont pas pris en compte dans la réduction de l'aléa.



- Considérer que les travaux de maçonnerie sans bourrage de la carrière (construction de piliers maçonnés en carrière, très rare en carrière de gypse), sous faible recouvrement ne permettent pas de réduire en aléa faible. Le ciel de carrière est renforcé quand les piliers reprennent la fracturation et les efforts sur le ciel de carrière. Toutefois, les piliers sont plutôt calculés pour reprendre les charges de la construction sans se préoccuper du ciel de carrière. Si la carrière reste vide, elle pourra toujours être l'objet de dégradation dans le temps. Étant donné les travaux au niveau de la carrière, la survenance d'un fontis est moindre, l'aléa sera donc descendu d'un degré d'intensité seulement.

Cependant, ces types de travaux (piliers maçonnés et pieux) peuvent être pris en considération lors de la réalisation de la carte des enjeux.

- Ne pas représenter toutes les zones d'aléa dont la surface ne serait pas visible à l'échelle du 5000<sup>ème</sup>. L'une des difficultés lors du tracé des aléas est donc de garder une vision d'ensemble même si chaque chantier est étudié à une échelle plus grande.
- Considérer enfin que les zones de protection s'appliquent en limite d'exploitation des carrières, mais aussi en bordure de zone consolidée par piliers maçonnés ou injection, puisque la remontée d'un fontis en s'évasant peut dans l'absolu entraîner des dommages même au droit d'une zone non exploitée ou bien consolidée de la sorte, dans la limite de la zone de protection. En revanche l'emploi de fondations profondes (après comblement pour les pieux) met à l'abri de ce mécanisme puisque la fondation se fait sous la zone d'influence d'un tel fontis.
- Considérer qu'un fontis venu à jour ancien a déjà développé sa zone de protection. Il ne peut que faire des affaissements par la suite. On baisse donc d'une intensité par rapport à l'aléa environnant. Un fontis venu à jour récemment peut encore évoluer s'il n'a pas été traité rapidement. Il reste dans l'aléa environnant.

Ces niveaux d'aléas ont été cartographiés à l'échelle 1/5000.

