CARTOGRAPHIE DE L'ALEA INDUIT PAR D'ANCIENNES CARRIERES SOUTERRAINES EN MILIEU URBAIN DENSE

Sandrine ARBIZZI[1], Charles KREZIAK[1], Anne-Marie LEPARMENTIER[2].
1 Laboratoire Régional de l'Est Parisien (LREP), Le Bourget-Melun, France.
2 Inspection Générale des Carrières de Paris (IGC), France.

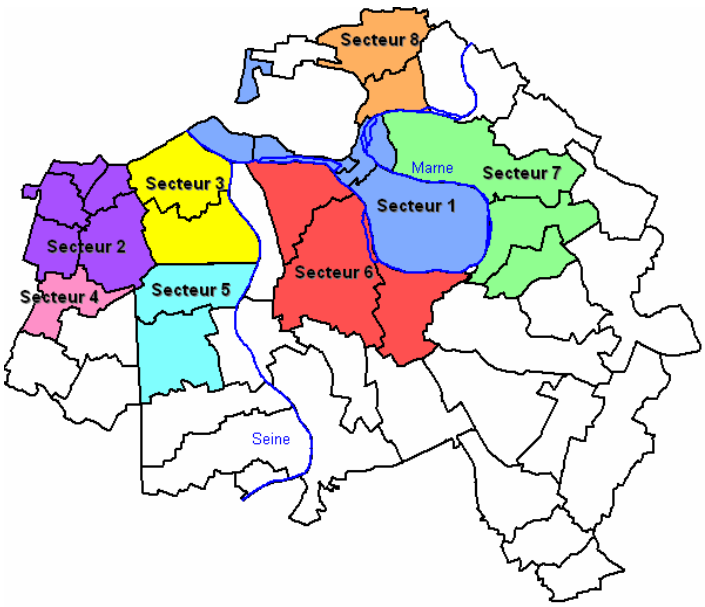
RÉSUMÉ – Dans le cadre du PPR « Mouvements de terrain » de 22 communes du Val-de-Marne, le LREP et l'IGC de Paris élaborent de concert les cartes de l'aléa induit par d'anciennes carrières souterraines. Les études s'appuient notamment sur des échanges d'information avec les collectivités et sur la détermination des zones d'exploitabilité du Calcaire Grossier.

1. Contexte de prescription du Plan de Prévention des Risques dans le Val de Marne.

Du fait des nombreux aménagements en milieu urbain et de la forte mobilité de la population francilienne, les anciennes carrières autrefois intensivement exploitées pour l'extraction de matériaux sont progressivement tombées dans l'oubli. Cependant les différents désordres liés à leur dégradation peuvent brutalement rappeler les risques qu'elles représentent.

Dans les années 1980, des périmètres d'anciennes carrières souterraines ont été délimités de façon approximative dans le Val-de-Marne pour cerner les zones touchées et soumettre ainsi les permis de construire à l'avis de l'IGC. Environ 96% des zones sous-minées dans ce département se trouvent en zone urbaine (hors espaces agricoles et espaces naturels) dont 75,4% sont construites (Leparmentier et al, 2005). Le 1er août 2001, 22 communes faisaient l'objet d'un arrêté de prescription de Plan de Prévention des Risques (PPR) « mouvements de terrain », que le service instructeur a souhaité engager au niveau départemental.

Devant l'ampleur de la tâche, la Direction Départementale de l'Equipement (DDE) a étalé les études techniques sur trois ans en les confiant à l'IGC et au LREP, choisis pour leur capacité opérationnelle et leurs connaissances respectives des carrières locales et des procédures PPR. Les communes ont été regroupées en bassin de risques, établis en fonction de la localisation et de la nature des exploitations (figure1).



Secteurs	Matériaux exploités (en souterrain ou à ciel ouvert)							
	Alluvions An-ciennes	Limons des Plateaux	Argile Verte	Travertin de Brie	Gypse	Calcaire de Champigny	Calcaire Grossier	Argile Plastique
1	✓						✓	
2		✓	✓	✓	✓		✓	✓
3	✓						✓	
4				✓	✓			
5			✓	✓	✓			
6	✓				✓		✓	
7						✓	✓	
8				✓	✓			

Figure 1. Communes du Val-de-Marne concernées par le PPR et matériaux exploités. Découpage en huit bassins d'étude entre l'IGC (secteurs 1-3) et le LREP (secteurs 4-8).

2. Présentation des carrières et principaux désordres.

Les cavités susceptibles d'entraîner des désordres en surface dans le Val-de-Marne concernent le Calcaire Grossier lutétien (565 ha), le Gypse ludien (104 ha), le Calcaire de Champigny ludien et le Travertin de Brie sannoisien.

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. Ils sont au nombre de quatre : à ciel ouvert ou en souterrain par la méthode des piliers tournés, des « hagues et bourrages » ou des rameaux. A partir des affleurements sur les versants, le recouvrement augmentant, les carriers ont extrait en souterrain avec des entrées en cavage ou des puits d'extraction et de service.

La méthode « des piliers tournés » laisse régulièrement du matériau en place qui constitue des piliers naturels. Les salles d'exploitation abandonnées très partiellement remblayées sont hautes (jusqu'à 7m) et présente de grandes portées, voire trop grandes. Le taux de défruitement moyen atteint 65 %. Cette méthode concerne les carrières de Gypse ludien, de Calcaire de Champigny et les plus anciennes de Calcaire Grossier.

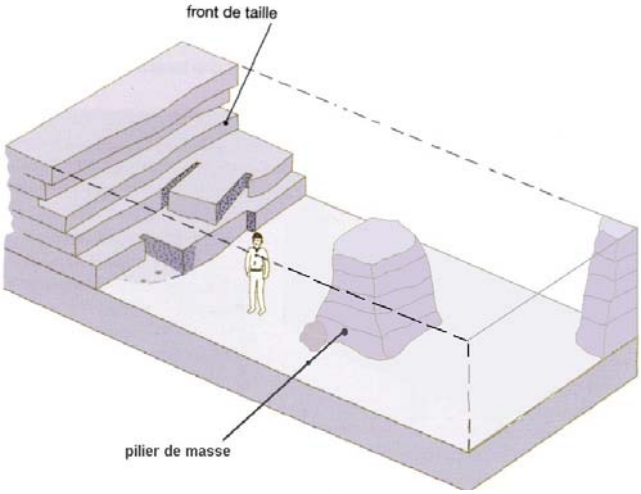


Figure 2 : Schéma d'exploitation par piliers Tournés.

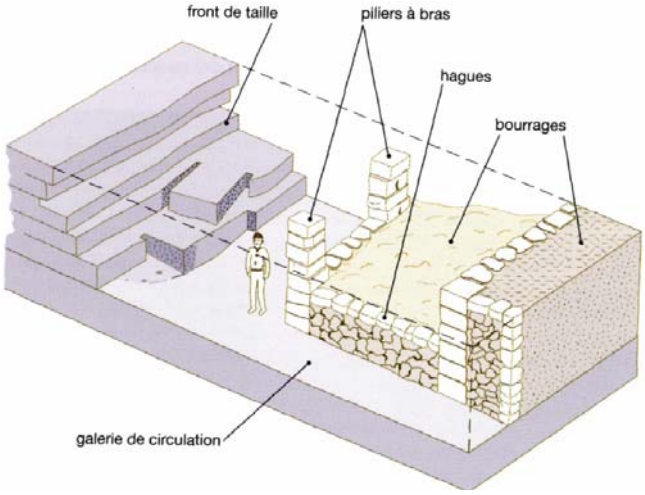
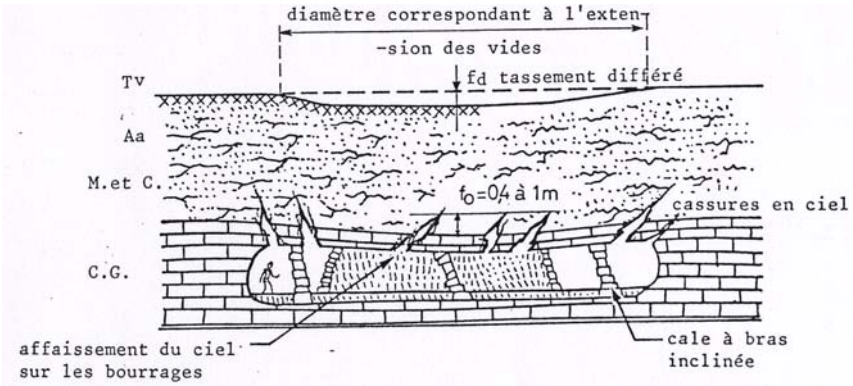


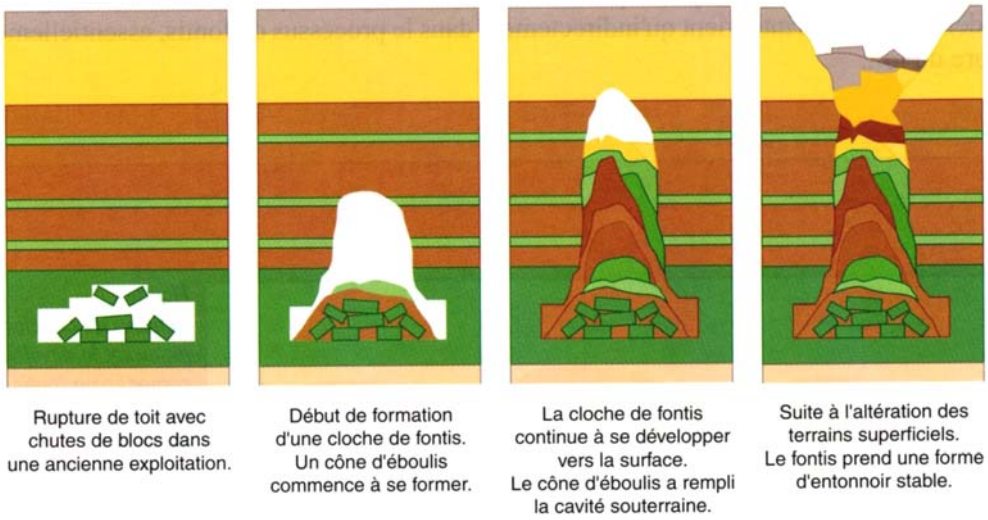
Figure 3 : Schéma d'exploitation par hagues et bourrages (IGC).

La méthode par « hagues et bourrages » consiste à soutenir le ciel de la carrière par des piliers de pierres sèches (cales à bras) et à combler les vides par des remblais maintenus par des murs de pierres sèches (hagues). Le taux de défruitement est de 100 % mais les hauteurs de galerie sont moindres (1,5-2m en moyenne). Les galeries de front de taille et de circulation restent vides et présentent maintenant des signes visibles de vieillissement tels que l'écaillage, la fragmentation, la fissuration, voire la ruine. Le ciel s'affaisse sur les remblais et casse au front de taille (cisaillement). Les bancs séparatifs entre étages sont souvent très minces (figures 4 et 5).



Figures 4 et 5 : Tassement différé au droit d'une carrière en hagues et bourrages (IGC).

Les désordres de surface sont consécutifs à la présence de vides dans les bancs de calcaire qui inexorablement vont se refermer, entraînant l'effondrement des terrains sus-jacents. 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 plus ou moins importante appelée *affaissement* soit une cavité appelée "*fontis*" (figures 6 et 7). Les affaissements et les fontis sont des phénomènes localisés, d'une forme circulaire et de diamètre plus ou moins grand. Lorsqu'un effondrement par rupture des piliers tournés concerne une grande partie de la carrière et se fait brutalement, on parle d'un *effondrement généralisé*.



Figures 6 et 7 : Schéma d'évolution d'un fontis (LCPC et al, 2002) et cloche de fontis (IGC).

Les processus de dégradation des carrières 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. Les infiltrations d'eau accidentelles (fuite de réseau, absence d'assainissement, cuves non étanches) ou récurrentes (infiltrations de versant, crues, marnages) en sont les principales causes. S'ajoutent les problèmes liés à la géométrie (taux de défruitement trop élevé, murs ou pieds de carrière trop minces, disposition hétérogène des piliers entre étages superposés, décapage des niveaux argileux dans les terrains de recouvrement, …) et ou au couvert végétal, essences à racines abondantes et profondes, qui éclatent les ciels et piliers.

3. Conduite des études sur les premiers secteurs étudiés.

3.1. Les trois grandes étapes d'élaboration du Plan de Prévention des Risques.

Le Plan de Prévention des Risques naturels a été institué par la loi Barnier en 1995 et son élaboration est sous la responsabilité et à l'initiative de l'Etat. A travers ses objectifs de connaissance du risque et de réduction de la vulnérabilité, ce document permet de délimiter les zones exposées et de les réglementer en limitant ou conditionnant la constructibilité. Une fois approuvé, le PPR vaut servitude d'utilité publique et doit être annexé aux documents d'urbanisme.

L'élaboration du PPR s'effectue en trois principales étapes.

La première étape concerne la connaissance du phénomène naturel, qui se traduit principalement par deux cartographies : la *carte informative des phénomènes connus*, et la *carte des aléas*. Les études sont menées d'après l'état actuel des connaissances, donc a priori sans campagne d'investigations complémentaires. Cette phase est assurée par le LREP et l'IGC sur leurs secteurs d'étude respectifs. Un travail d'harmonisation méthodologique a été mené en amont entre les deux organismes afin d'assurer une homogénéité technique.

La deuxième phase consiste à établir une *carte des enjeux*, dressée par la DDE. Cette carte résulte de l'analyse de l'occupation des sols, de l'évaluation des personnes exposées et de la localisation des zones sensibles.
Le croisement de la carte des aléas et de la carte des enjeux conduit à la *carte réglementaire*, où les zones sont délimitées par type de prescriptions homogènes. A ce stade de l'étude, cette phase n'a pas encore été achevée dans les différents secteurs.

3.2. Des phases de communication et concertation indispensables.

Le PPR peut être considéré par les collectivités comme un ensemble de contraintes imposées par l'Etat et il est indispensable de montrer la convergence des intérêts de chacun vers la prévention des risques et la protection des personnes et des biens.

Avant le lancement des études à proprement dit, le service instructeur adresse aux communes un courrier afin d'introduire les organismes techniques et de faciliter la prise de contact. Une première réunion est organisée en présence de la DDE afin de présenter les objectifs, le déroulement et les conséquences du PPR, permettant d'impliquer les communes et de favoriser la prise de conscience des risques. Divers échanges ont ensuite lieu pour établir un bilan des connaissances des carrières sur le territoire et lister les contacts susceptibles de détenir des informations intéressantes. La synthèse des renseignements récoltés à cette issue est présentée en commune pour validation au regard de la mémoire territoriale. Le point fort de ces échanges est de rassurer sur la transparence de la démarche et surtout d'intégrer les connaissances locales indispensables pour la qualité de l'étude.

Les premières cartes d'aléas ont été présentées aux communes au cours d'une réunion tripartite rassemblant l'organisme technique, le service instructeur et les services techniques des communes, dont l'avis est recueilli. La même démarche sera adoptée pour la carte des enjeux.

Bien que cette démarche ouverte sur les échanges et la concertation puisse paraître lourde, elle est nécessaire pour l'appropriation des conclusions de l'étude et des prescriptions qui seront induites par le PPR. Elle s'inscrit dans les recommandations du guide de la concertation (MEDD, 2002).

3.3. Un important travail de synthèse des informations relatives au territoire étudié.

Le travail du LREP et de l'IGC consiste à rassembler tous les renseignements disponibles sur le contexte géomorphologique, géologique et hydrologique de chaque commune étudiée ainsi que sur l'historique des carrières, leurs caractéristiques et leur état actuel.

Les principaux éléments sont puisés dans les archives internes de l'IGC et du LREP, les premières fournissant des cartes des carrières connues au 1/1.000 et 1/20.000 et des écorchés géologiques, les secondes des reconnaissances géotechniques, études géologiques et hydrologiques ou expertises. Dans le cas de carrières encore accessibles, l'IGC effectue également des visites. La quantité d'informations détenues est relativement importante, du fait de l'ancienneté de l'activité de l'IGC et du grand nombre d'aménagements auxquels le LREP a participé.

Les observations de terrain sont rendues difficiles par la densité du tissu urbain, mais quelques désordres sur bâtis peuvent être constatés. L'analyse est complétée par photo-interprétation par stéréoscopie de clichés aériens. Sur le premier secteur étudié par le LREP, celles-ci s'étalent entre les années 1926 à 1957, à des échelles comprises entre 1/20.000 et 1/5.000 (LREP, 2005). En dehors des désordres débouchant en surface, ces photographies permettent d'observer les aménagements associés aux carrières (entrées en cavage, puits de ventilation…comme indiqué sur la figure 8). Ces éléments indiquent ainsi les extensions non cartographiées mais révèlent également les zones où des terrassements ont pu faire disparaître les anciennes galeries et où il n'existe plus de vides souterrains significatifs.

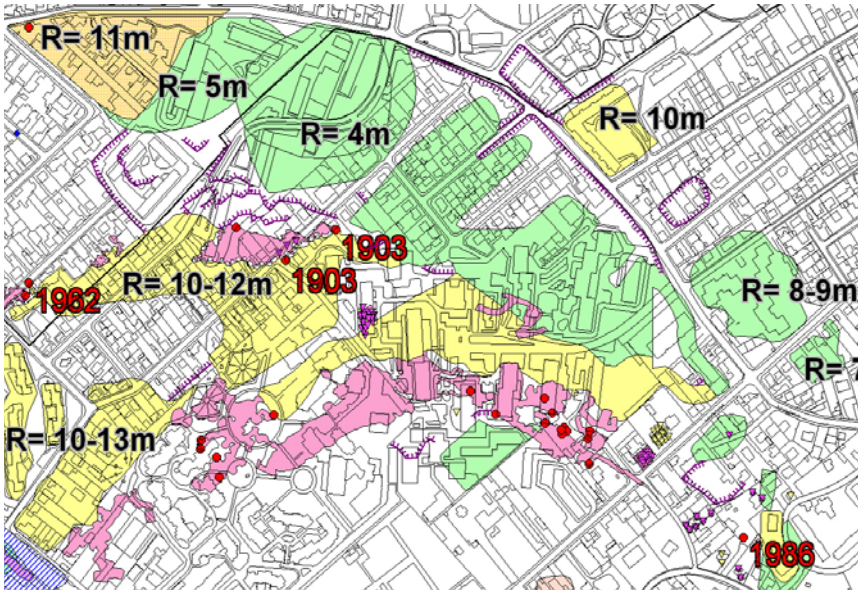
Photo-interprétation

- Entrée en cavage
- Puits
- Zone remaniée
- Dénivelé topographique

Figure 8. Cliché aérien (1926) au droit d'exploitations de Calcaire Grossier sur les communes de Maisons-Alfort – Créteil (LREP, 2005).

Les acteurs présents sur le territoire, notamment les différents concessionnaires, sont sollicités par courrier pour leur connaissance du sous-sol et des consolidations effectuées. Cette collecte est doublée d'enquêtes de terrain, dans lesquelles sont associés les services techniques des communes, le conseil général, les associations, des historiens locaux, des « anciens » ayant une mémoire locale, la RATP, certaines entreprises de BTP… Les archives départementales et celles de la DRIRE sont également consultées.

La synthèse des données récoltées est enfin représentée sur la carte informative qui reflète l'état des connaissances à la date de la conduite de l'étude (rendu à l'échelle 1/5.000). La figure 9 en présente un extrait sur les communes de Maisons-Alfort et Créteil.



- Ancienne exploitation à ciel ouvert d'alluvions anciennes (Hauteur de remblais R).
- Ancienne exploitation à ciel ouvert de Calcaire Grossier supérieur (Hauteur de remblais R).
- Ancienne exploitation à ciel ouvert de Calcaire Grossier inférieur (Hauteur de remblais R).
- Indices d'excavation (photo-interprétation multi-dates).
- Ancienne exploitation souterraine de Calcaire Grossier.
- Présence probable d'ancienne carrière souterraine.
- Fontis ou désordres (Date de venue à jour).
- Sondage ou indice prouvant la présence d'une carrière souterraine.
- Sondage indiquant une hauteur de remblais supérieure à 6m.
- Sondage ou indice prouvant l'absence de carrière souterraine de Calcaire Grossier supérieur.
- Sondage ou indice prouvant l'absence de carrière souterraine de Calcaire Grossier inférieur.
- Bourrage par injection de mortier de ciment.

Figure 9. Extrait de carte informative : phénomènes historiques ou observés (LREP, 2005).

3.4. Des extensions de carrières à interpréter.

Les cartes détenues par l'IGC sont riches en informations mais peuvent se révéler localement déficientes, celles-ci étant issues de plans parfois anciens et imprécis. Les indices de galeries, hors périmètre sous-miné connu, confirment l'hypothèse que les exploitations aient pu se prolonger. Toutefois l'interprétation de l'extension possible des zones exploitées est difficile à déterminer pour des carrières inaccessibles et les études dans le cadre du PPR ne peuvent s'appuyer sur des reconnaissances complémentaires. Sur le premier secteur étudié par le LREP, l'interprétation de l'extension des carrières a été appréhendée par une modélisation numérique des zones potentiellement exploitables et d'après d'anciennes limites cadastrales.

3.4.1. La limite d'exploitabilité du Calcaire Grossier.
Sur les communes de Créteil et Maisons-Alfort, le toit de la couche géologique a été modélisé à partir des sondages pertinents disponibles (données LREP, BSS et IGC, soit 564 sondages).

Cette modélisation précise la côte du toit du Calcaire Grossier et met en évidence les lieux d'exploitations privilégiées. Sa proximité du terrain naturel l'a rendu facilement exploitable à ciel ouvert ou en souterrain.

Au vu des dates anciennes des exploitations connues, il a été considéré que l'exploitation n'avait été menée que lorsque le matériau se trouvait hors nappe (considérée à 29m NGF). Il en a été déduit un périmètre approximatif d'exploitabilité du Calcaire Grossier, utilisé comme outil d'interprétation et de délimitation des extensions possibles de galeries (figure 10).

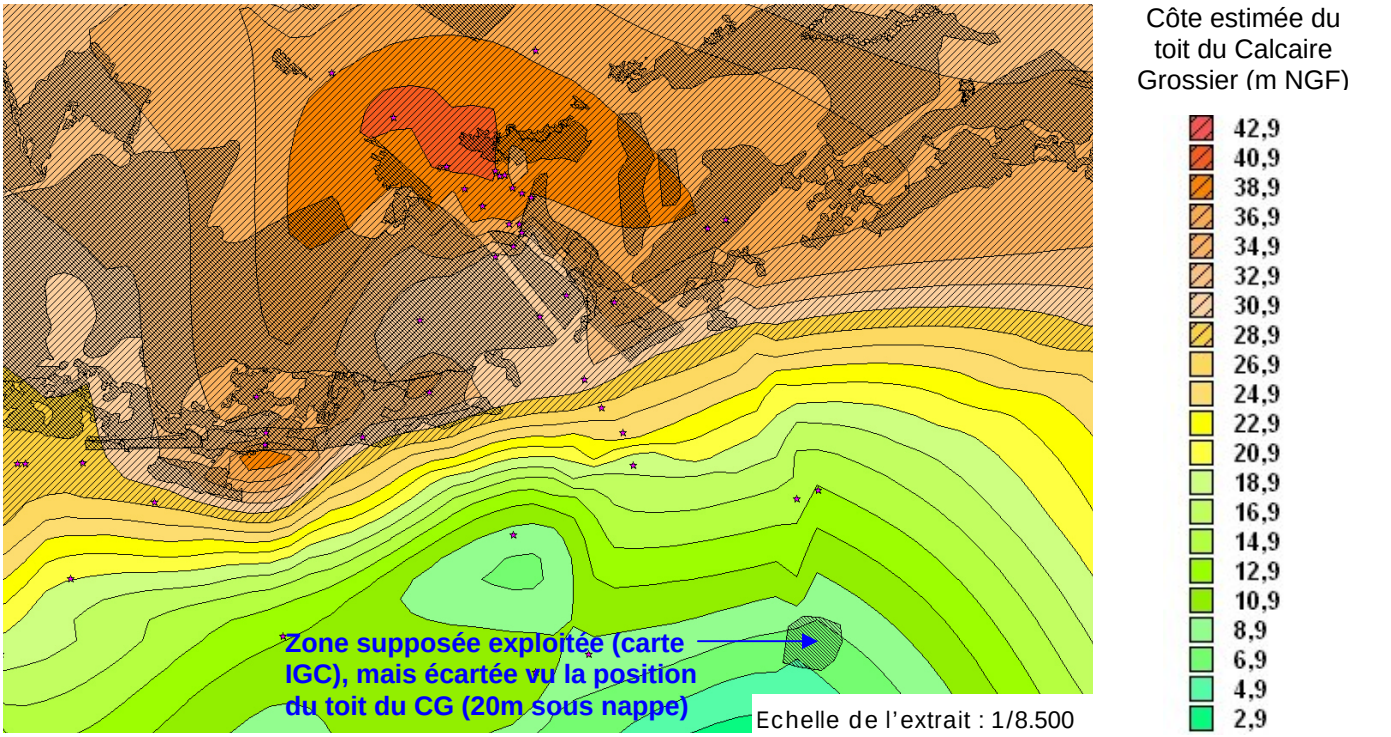


Figure 10. Exemple du croisement de la modélisation du toit du Calcaire Grossier, des exploitations connues/supposées et interprétation (LREP, 2005)

Sondages utilisés pour la modélisation
Zone estimée d'exploitabilité du Calcaire Grossier
Zones exploitées (d'après la carte informative)

3.4.2. Les anciennes limites cadastrales.
Dans les secteurs où les informations précédentes se révélaient insuffisantes pour conclure à l'extension plausible de certaines carrières, le cadastre napoléonien a servi de repère (cartes de 1813-14 et 1841). Il a en effet été considéré que les extensions pouvaient être approchées au travers des parcelles traversées par des galeries. Si tel est le cas, des droits d'exploitations y ont été acquis et des extensions ont pu être creusées sur toute la superficie : toute la parcelle est donc concernée.

4. Qualification des aléas liés aux anciennes carrières.

Les aléas liés aux carrières dépendent non seulement de la géométrie générale (profondeur, type d'exploitation, qualité du remblaiement, protection du front de taille contre les infiltrations d'eau, qualité du recouvrement…), mais aussi du contexte géographique qui détermine les facteurs aggravants (urbanisation, proximité d'un versant, végétation…). Dans le Val de Marne, le risque de fontis et/ou d'affaissements est élevé dans toutes les zones concernées par les anciennes carrières souterraines vides ou partiellement remblayées.

L'intensité de l'aléa est définie en fonction de l'impact estimé sur les personnes et sur les biens : risque d'atteinte à la vie de personnes, fissurations plus ou moins importantes du bâti, voire mise en péril ou ruine de la structure. Il est nécessaire d'apprécier également la probabilité d'occurrence. Contrairement à certains aléas engendrés d'autres phénomènes naturels, ceux liés aux anciennes carrières, tels le fontis et l'effondrement généralisé, se produisent a priori une seule fois et ne peuvent être appréhendés par leur période de retour.

A partir de ces critères quatre niveaux d'aléas ont été déclinés et cartographiés au 1/10.000. Les confortations réalisées ont également été considérées (tableau I).

Une zone de protection et une marge de reculement ont également été retenues : la première d'un même niveau d'aléa que les zones sous-minées, la seconde d'un niveau inférieur (distances reportées dans le tableau II). La zone de protection (ZP) correspond à la bande de terrain, bordant les emprises sous minées, susceptible de s'effondrer, durant la survenue d'un fontis en surface ou peu de temps après. La marge de reculement (MR) représente la zone d'influence d'un événement survenu en surface, ou susceptible de se produire. Au-delà, aucun désordre n'est à craindre pour les aménagements de surface. Ces bandes dépendent du matériau exploité, du type d'exploitation et de la superposition des exploitations.

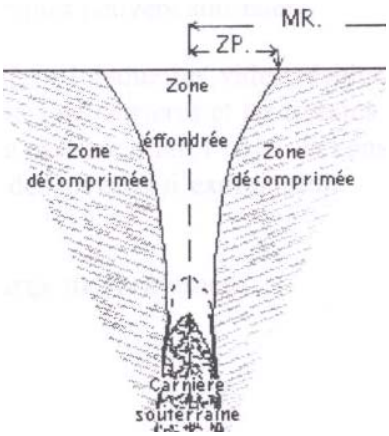


Figure 11 : Zone de protection et marge de reculement.

Tableaux I et II : Niveaux d'aléas et valeurs des bandes de sécurité (ZP, MR) retenues.

Contexte	Aléa retenu
Fontis repéré	Très fort
Galeries vides / partiellement remblayées d'origine	Fort
Galeries « remblayées »	Modéré
Galeries « remblayées » clavées	Modéré
Galeries « consolidées »	Faible
Puits d'accès non ceinturé	Fort à faible

Contexte	ZP	MR
Carrière «consolidée» et entrée en cavage	0	0
Carrière «remblayée»	2m	4m
Carrière vide de hauteur <4m	4m	8m
Carrière de hauteur >4m ou à 2 étages	8m	16m

La figure 12 suivante présente un extrait de la cartographie obtenue :

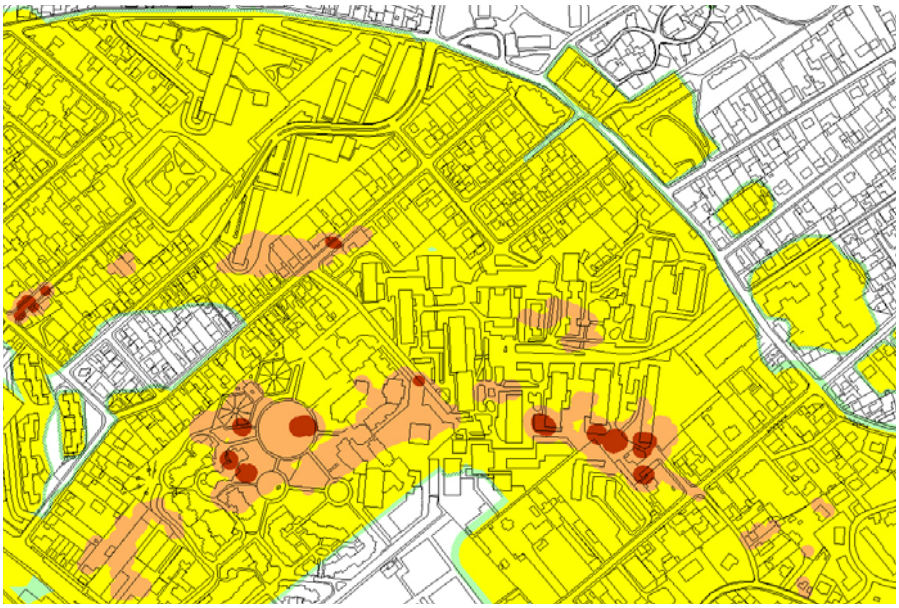


Figure 12 : Extrait de carte d'aléas (LREP, 2005).
A noter que les zones d'exploitation à ciel ouvert remblayées figurent également (aléa modéré).

5. Esquisse des prescriptions réglementaires.

Bien que les études ne soient pas encore finalisées, il est possible au regard des pratiques régionales d'apprécier le type de mesures réglementaires susceptibles d'être retenues.

Dans les secteurs où un risque très fort existe, l'urbanisation est généralement figée par une inconstructibilité. Seuls les travaux liés aux infrastructures indispensables à la continuité du service public sont admis. Dans les zones moyennement ou faiblement exposées, la définition des dispositions constructives est subordonnée aux conclusions d'une étude géotechnique préalable. Suivant le niveau du risque et la nature de l'infrastructure (établissement recevant du public ou bâti privé), cette étude est imposée ou recommandée.

En parallèle, un certain nombre de dispositions préventives et de sauvegarde sont établies (diagnostic régulier des réseaux d'assainissements, délimitation de zone de protection en cas d'effondrement…).

6. Conclusion.

L'élaboration de la cartographie d'aléa sur les communes des premiers bassins de risque nous conduit à retenir quelques points importants, du point de vue méthodologique :

- Les secteurs en milieu urbain bénéficient de nombreuses études qui facilitent la compréhension du territoire. Il s'agit d'un véritable avantage étant donné les délais et les moyens associés à une étude de type PPR.
- La dispersion des données techniques représente cependant un frein important à l'avancée de l'étude. Les maîtres d'œuvre et plus encore les maîtres d'ouvrages n'accordent que peu d'importance à la pérennité des archives. De fait, il convient de recouper soigneusement toutes les sources d'informations pour éviter une synthèse incomplète et donc erronée.
- La concertation avec les acteurs locaux est des gages de qualité et d'acceptation de l'étude. Les informations récoltées apportent une richesse indispensable au travail de synthèse. Les échanges permettent en outre une prise de conscience du risque et favorisent l'appropriation du projet.
- Enfin, il est à souligner que la pression foncière en milieu urbain peut être telle que les prescriptions réglementaires peuvent en être influencées. A titre d'exemple, la réalisation de travaux a priori lourds peut être envisageable dans les projets de construction, au vu du niveau de prix des terrains à bâtir dans la région.

7. Références bibliographiques.

LCPC, INERIS, MATE (2002). Evaluation des aléas liés aux cavités souterraines. Guide technique. *Collection Environnement Les risques naturels.*

Leparmentier A.M., Delannoy M.A., Lebrun E. (2005) Les PPR mouvements de terrain : les interventions de l'IGC. *Les cahiers de l'IAURIF n°142, 75-85.*

LREP (2005). Plan de prévention des risques naturels. Cartographie de l'aléa mouvement de terrain. Département du Val de Marne, communes de Créteil, Maisons-Alfort, Bonneuil-sur-Marne. Dossier 2.1.17049.

Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (2002). Plans de prévention des risques naturels. Guide de la concertation. *La documentation française.*