

# CARACTERISATION GEOMECHANIQUE D'UNE CARRIERE SOUTERRAINE ABANDONNEE PAR DES MESURES IN-SITU

## GEOMECHANICAL CHARACTERISATION OF AN ABANDONED UNDERGROUND QUARRY USING IN-SITU MEASUREMENTS

Temenuga GEORGIEVA<sup>1</sup>, Fanny DESCAMPS<sup>1</sup>, Sara VANDYCKE<sup>1</sup>, George AJDANLIJSKY<sup>2</sup>, Jean-Pierre TSHIBANGU<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Mons, UMONS, Faculté Polytechnique, Mons, Belgique

<sup>2</sup> University of Mining and Geology « St. Ivan Rilski », Faculty of Geology, Sofia, Bulgaria

**RÉSUMÉ** – Le site de la Malogne est une carrière souterraine abandonnée où la craie phosphatée a été exploitée à faible profondeur par la méthode des chambres et piliers. Plusieurs effondrements conséquents ont été enregistrés. Le RMR<sub>89</sub> et le GSI ont été employés pour identifier différentes zones géomécaniques sur le site et délimiter des zones à haut potentiel d'effondrement.

**ABSTRACT** – The Malogne site is an abandoned underground quarry where phosphatic chalk was mined out at shallow depth by the room and pillar method. Several major collapses have been recorded. The RMR<sub>89</sub> and the GSI have been used to identify different geomechanical zones on the site and to delineate zones with a higher risk of failure.

### 1. Introduction

Dans la région de Mons (Belgique), la Malogne est une carrière souterraine qui a exploité, de 1873 aux années 50, la craie phosphatée à faible profondeur (20 à 30 m) par la méthode des chambres et piliers. Le site occupe une aire totale de 67 ha (Figure 1a) et est proche d'importantes infrastructures (voie ferrée Paris-Bruxelles, autoroute R5) et de zones résidentielles. Le taux de défrètement varie de 60 à 70 % et certaines parties ont été remblayées partiellement avec des schlamms en cours d'exploitation, avant d'être déblayées par la suite (Leclercq et Bouko, 1985). La géométrie des chambres et piliers est assez irrégulière, en lien avec les conditions hydrogéologiques et l'historique de l'exploitation.

Cela crée un contexte favorable aux instabilités, tant au niveau des cavités souterraines qu'en surface. Pendant et après l'exploitation, plusieurs effondrements significatifs ont été enregistrés, dont le dernier, en 2015, a eu des répercussions en surface sur une aire de 1.2 ha et avec une amplitude de 3 m maximale (Kheffi et Pacyna, 2016 ; Figure 1b). Parmi les études menées sur le site, on peut citer des inspections périodiques depuis 1993, avec des mesures de tassements en surface et de mouvements des fissures (Funcken et Welter, 2004). Après l'événement de 2015, une nouvelle méthodologie a été initiée pour aider les autorités publiques. Elle consiste à cartographier les risques à partir de quelques paramètres pertinents évalués sur des sous-secteurs de la carrière : hauteur des chambres, inspections visuelles de l'état des piliers, niveau d'eau moyen (Kheffi et Pacyna, 2016).

Pour clarifier le contexte géomécanique de ces cavités souterraines, nous proposons de qualifier le massif rocheux au moyen de systèmes de classification bien connus : le Geological Strength Index (GSI) et le Rock Mass Rating (RMR<sub>89</sub>). Au cours de ce travail, nous avons réalisé une étude structurale et déterminé différents paramètres

géomécaniques du massif. La combinaison de ces résultats aboutit à une cartographie géomécanique du site de la Malogne.

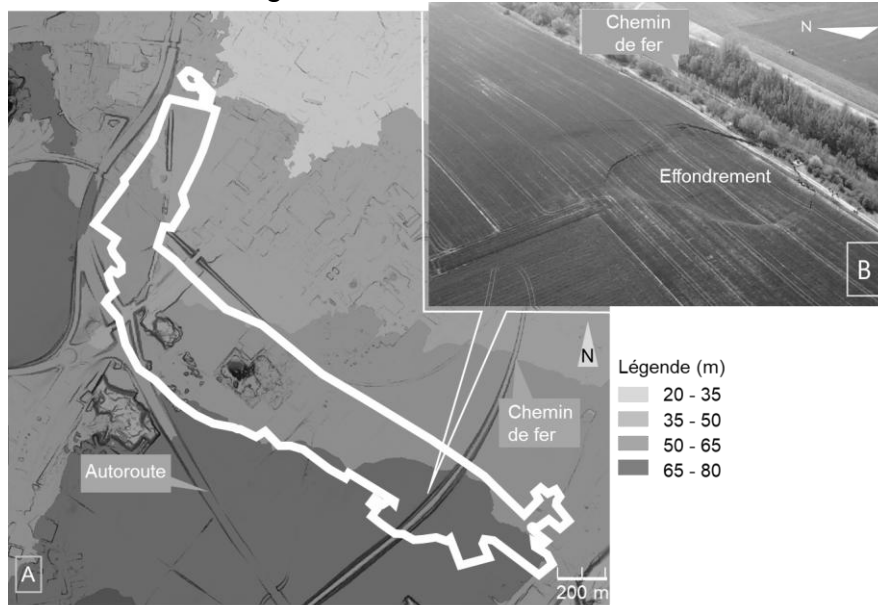


Figure 1. (A) Modèle numérique de terrain (Lidar, SPW 2016) montrant la position de la carrière souterraine de la Malogne (en blanc) et les infrastructures de surface. (B) Photographie aérienne de l'effondrement du 22 avril 2015 (CACEff, 2015).

## 2. Contexte géologique et hydrogéologique

La zone étudiée se situe dans le Bassin de Mons, dans le prolongement du Bassin de Paris. La craie phosphatée qui a été exploitée est une calcarénite du Maastrichtien (Vandycke, 1992) qui présente une allure tabulaire avec pendage moyen de 7° à 9°. Au mur de cette couche se trouve la craie blanche du Campanien tandis que le toit est constitué d'un hardground de 60 cm d'épaisseur moyenne (Vandycke, 1987). Le hardground est recouvert de tuffeau puis de terrains meubles (sables et argiles du Thanétien au Pléistocène). Robaszynski et al. (2001) donnent une description géologique détaillée de ces formations.

Sur le plan hydrogéologique, l'exploitation permanente de la nappe aquifère entraîne que seule la partie NE de la Malogne est sous eau (SPW, 2019). Le niveau d'eau varie au fil des saisons, de sorte qu'une partie des piliers est exposée à des cycles de saturation-séchage. Ainsi, trois zones peuvent être distinguées : (1) la zone sèche ; (2) la zone de transition et (3) la zone saturée (Figure 2).

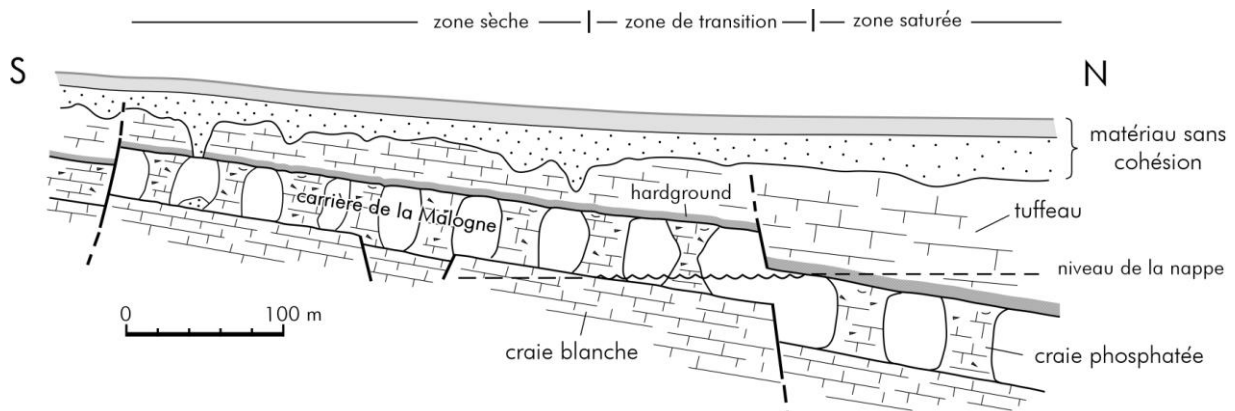


Figure 2. Coupe schématique de la carrière de la Malogne (d'après Pacyna, 1992; avec modifications) avec la superficie des zones sèches, de transition et saturées.

### 3. Méthodologie des mesures in situ

Une zone test de 25 ha située dans la partie nord-ouest du site a été sélectionnée pour réaliser cette étude (Figure 3). D'une part, un levé structural permet d'identifier et décrire les discontinuités. D'autre part, la mesure de différents paramètres géomécaniques (RQD, JRC, résistance de la roche intacte, présence d'eau, etc.) conduit d'une part à une description qualitative du massif avec le GSI (Marinos et al. 2005) et, d'autre part, à une classification quantitative avec le  $RMR_{89}$  (Bieniawski 1989).



Figure 3. Plan de la carrière de la Malogne (source : SPW) avec localisation des levés structuraux, des mesures de RQD, des profils de JRC et de résistance.

#### 3.1. Levé structural

Dans notre cas, le levé structural vise surtout l'étude du degré de fracturation du massif pour l'intégrer dans l'estimation du GSI et du  $RMR_{89}$ . Les mesures structurales s'appuient sur la méthode de cartographie des surfaces (Brady et Brown, 2005). Elle consiste à mesurer toutes les structures rencontrées dans les limites de la zone sélectionnée. Cela réduit le biais des mesures résultant de l'orientation et de la taille des excavations (limitations en hauteur et en longueur), des dimensions des discontinuités, etc.

Les discontinuités sont caractérisées en termes de direction, pendage et état de surface. Parmi ces mesures, les principales discontinuités rencontrées ont été cartographiées.

Pour une meilleure compréhension de l'influence des fractures sur la stabilité du massif, Brady et Brown (2005) ont proposé de documenter les terminaisons des discontinuités mesurées (Figure 4). Ainsi, on distingue les discontinuités qui dépassent les limites de la zone mesurée (de l'excavation ou du pilier) (type x), les discontinuités qui se terminent dans ces limites (type r) et celles qui se terminent dans une autre discontinuité (type d). Leur orientation a été mesurée sur le terrain en prenant le pendage et la direction du pendage.

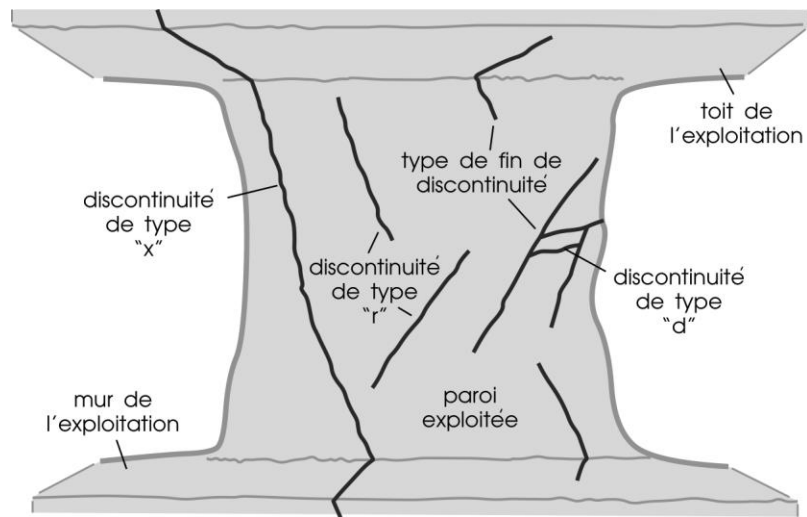


Figure 4. Schéma des types de discontinuités selon leur terminaison dans la zone mesurée (modifié de Brady et Brown, 2005).

### 3.2. Caractéristiques géomécaniques

Le *GS* fournit un système d'estimation de la réduction de la résistance du massif pour différentes conditions géologiques (Hoek et Brown, 1998). Il est basé sur deux caractéristiques fondamentales qui contrôlent largement le comportement mécanique des masses rocheuses : le degré d'interblocage du massif et les conditions des discontinuités. Dans ce travail, nous utilisons la version de Hoek et al. (2005) qui intègre les massifs rocheux de faible qualité.

Les conditions des discontinuités passent par l'observation de la nature et de l'état (remplissage, ouverture, etc.) des discontinuités in situ et par des mesures du coefficient de rugosité des joints (JRC). Ce coefficient varie de 0 (très lisse) à 20 (très rugueux). Il est déterminé par comparaison de profils levés sur les surfaces de joints (Figure 5a) avec des profils de référence (Ulusay et Hudson, 2007).

Le  $RMR_{89}$  (Bieniawski, 1989) est aussi employé dans cette étude. Dans ce système géomécanique, cinq niveaux de qualité du massif sont distingués, allant d'un rocher très bon ( $81 \leq RMR \leq 100$ ) à très médiocre ( $RMR \leq 20$ ). La classification est basée sur l'estimation des paramètres suivants : (1) la résistance à la compression uniaxiale ou l'indice Franklin; (2) le RQD ou taux de carottage modifié; (3) l'espacement des joints; (4) la nature des joints et (5) les venues d'eau.

La résistance de la roche a été estimée in situ au moyen d'un marteau de Schmidt de type PT (Figure 5b, 356 mesures) qui est adapté aux matériaux de faible résistance. Précisons que la surface de la roche est nettoyée et aplanie avant les mesures.

Le RQD intervient dans la détermination du  $RMR_{89}$ . Il considère la somme des longueurs des carottes supérieures à 10 cm rapportée à la longueur totale du forage et fournit une mesure approximative du degré d'homogénéité de la masse rocheuse (Hutchinson et Diederichs, 1996) en distinguant cinq catégories, de très mauvaise (0-25) à excellente (90-100). Comme aucun carottage n'est disponible pour le site, une méthode indirecte est employée pour évaluer directement le RQD en paroi rocheuse à partir de profils (Hutchinson et Diederichs, 1996). Des profils horizontaux et verticaux sont analysés dans ce travail.

Dans la zone ennoyée aucune mesure quantitative n'est possible dans ce secteur (mesure structurale, dureté Schmidt, RQD, JRC). Par contre, un sous-marin équipé d'une caméra (fourni par l'ASBL Projet Malogne) a permis l'observation et l'analyse qualitative du massif rocheux et montré l'existence de blocs détachés du toit (Figure 5c).



Figure 5. Mesures in situ (A) de la rugosité des joints (JRC) ; (B) de la résistance de la roche avec le marteau de Schmidt type PT et exemple (C) de blocs détachés dans la zone ennoyée.

#### 4. Résultats des caractérisations du massif rocheux

Plus de 30 visites ont été réalisées au cours desquelles 138 mesures de joints et 155 mesures de failles ont été levées. Les mesures d'orientation des failles et des joints sont tracées dans des projections stéréographiques dans lesquelles les directions dominantes sont présentées comme de grands cercles (Figure 6). Pour les failles, deux directions principales existent : F-1 selon une direction du pendage  $N218^{\circ}/70-75^{\circ}$  et F-2 selon  $N350^{\circ}/80^{\circ}$  (Figure 6a). La majorité des joints sont de type r. Deux familles conjuguées sont observées (Figure 6b) : la famille J-1 ( $N183^{\circ}/80^{\circ}$ ) a une direction de pendage similaire à F-1 tandis que la famille J-2 suit une direction  $N037^{\circ}/80-85^{\circ}$ . Quelques mesures indiquent aussi une troisième orientation de joints, moins bien représentée, et qui suit la même direction ( $N347^{\circ}/86^{\circ}$ ) que la faille F-2. En complément, des mesures sur la stratification  $S_0$  donnent une direction générale  $N148^{\circ}/9^{\circ}$ . Ces résultats sont cohérents avec des mesures précédentes (Vandycke, 1987).

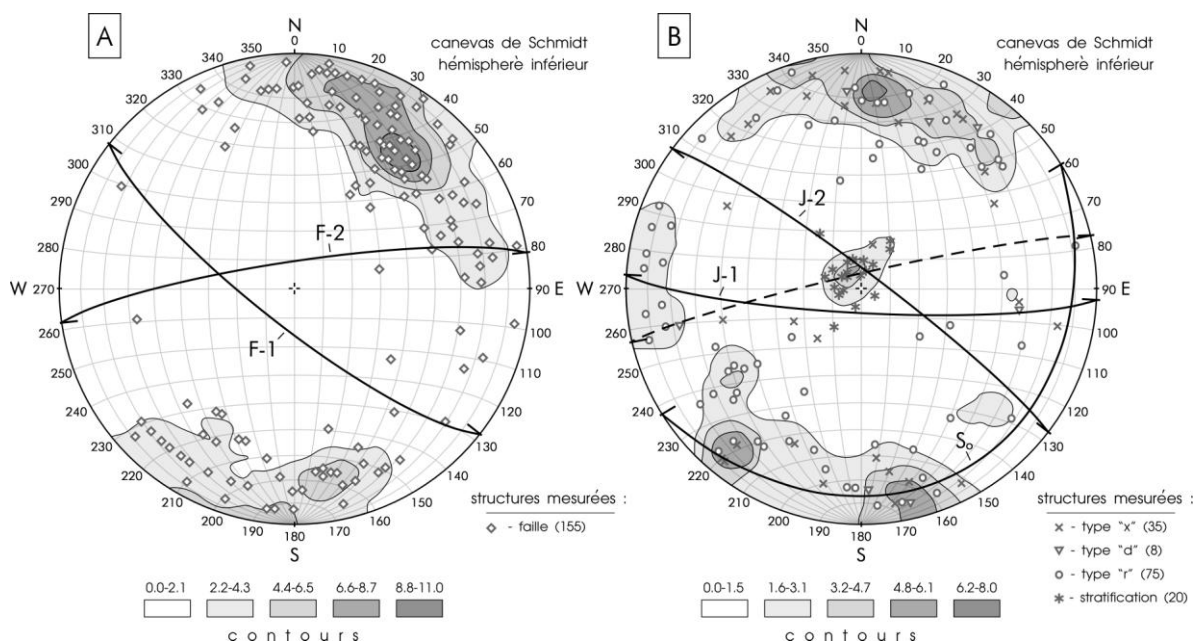


Figure 6. Projection stéréographique des poles des failles (A) et des joints (B), et leur densité et les grands cercles des directions dominantes.

Sur base du GSI, le massif n'a pu être distingué qu'en seulement deux zones géomécaniques. En effet, le niveau de fracturation varie de blocailleux à très blocailleux tandis que les conditions de surface des discontinuités vont de bonnes à assez bonnes. 39 profils d'une longueur minimale de 10 cm ont été réalisés pour mieux quantifier la rugosité des épontes; le JRC varie entre 8 et 14 à 16. Ainsi, à partir des abaques, on identifie une première qualité de rocher avec un GSI de 55 à 60, où la structure est blocailleuse et les discontinuités sont relativement rugueuses et légèrement altérées. Ces valeurs de GSI correspondent plutôt à la zone sèche de la carrière. Une seconde qualité de rocher est définie par un GSI compris entre 45 et 50, où la structure est très blocailleuse avec des surfaces modérément altérées. Ces valeurs sont plus typiques de la zone de transition du site, mais aussi pour les zones sèches très fracturées.

En ce qui concerne le  $RMR_{89}$ , compte tenu du contexte hydrogéologique, deux zones géomécaniques sont distinguées : il s'agit des zones sèche et de transition.

Les valeurs des mesures au marteau de Schmidt varient de  $R = 40$  à  $70$ . Les valeurs les plus basses sont obtenues dans la zone de transition tandis que les plus élevées sont typiques de la zone sèche. Ce résultat correspond à une note de 1 à 2 de la résistance dans le  $RMR_{89}$ .

Le RQD a été mesuré en paroi de piliers en huit endroits localisés à la Figure 3, six dans la direction horizontale et deux dans la direction verticale. Le Tableau 1 donne les résultats de RQD sur les profils tracés en parois. Les notes sont excellentes dans la direction horizontale (97 à 99 %) et bonnes dans la direction verticale (76 et 89 %). En général, le RQD pourrait être estimé comme relativement homogène dans la zone observée.

Tableau 1. Résultats des mesures de RQD. H, direction horizontale, et V, direction verticale. Les positions des mesures sont localisées à la Figure 3.

Position de mesure	RQD-1	RQD-2	RQD-3	RQD-4	RQD-5	RQD-6	RQD-7	RQD-8
Direction (H ou V)	H	H	H	H	H	H	V	V
Longueur du profil (m)	11.0	4.7	10.0	8.0	15.3	19.6	4.2	3.7
RQD (%)	99	98	97	97	100	99	89	76

Ainsi, en compilant les mesures et observations des différents paramètres, le Tableau 2 donne une synthèse du  $RMR_{89}$  sur la zone d'étude. Non seulement les conditions moyennes sont évaluées mais aussi les plus favorables (max) et les plus défavorables (min). Les résultats obtenus montrent une nette différence entre les zones sèches et transition. Sur base des valeurs des  $RMR_{89}$ , la qualité des roches de la zone sèche varie de bonne à médiocre. La différence de qualité de la roche résulte principalement de la nature des surfaces de joints qui varient de légèrement rugueuses et non altérées à lustrées et joints ouverts de 1 à 5 mm mais aussi par l'espacement des joints. Pour les zones de transition, c'est surtout la présence d'eau qui influence la qualité du massif, qui varie de moyen à médiocre. L'eau agit particulièrement sur l'altération de la surface des discontinuités.

Tableau 2. Evaluation du  $RMR_{89}$  pour les différentes zones de la carrière de Malogne.

Paramètre	Note RMR en zone sèche			Note RMR en zone de transition		
	Minimum	Moyenne	Maximum	Minimum	Moyenne	Maximum
Résistance de la roche	1	2	2	1	1	1
RQD	17	20	20	17	17	20
Espacement des joints	6	10	15	5	8	10
Nature des joints	5	15	20	0	10	15
Venues d'eau	10	13	15	0	4	7
$RMR_{89}$	39	60	72	23	40	53
Classe de rocher	IV Médiocre	III Moyen	II Bon	IV Médiocre	IV Médiocre	III Moyen

Pour estimer la qualité du massif de la Malogne, une combinaison du GSI et du  $RMR_{89}$  a été utilisée, et les conditions les moins favorables ont été considérées. Ainsi, trois zones géomécaniques ont été distinguées et indiquées sur le plan de la zone étudiée : bon, moyen et médiocre (Fig. 7). Les anciennes zones effondrées et les zones inaccessibles aux mesures in situ ont également été indiquées. Une zone de classe IV dans la partie sud de la carte a été mise en évidence en se basant sur les failles identifiées et leur influence sur la qualité du massif rocheux. Dans la partie sud-ouest, près de la zone déjà effondrée, le rocher a été classifié comme médiocre (IV). Le reste de la zone sèche est divisé en zones géomécaniques de classes II (dans la partie centrale) et III (au nord, qui suit la direction du pendage des couches).

La zone de transition dans la partie nord a été délimitée en fonction du niveau d'eau approximatif pendant la période des mesures in situ. Les résultats des deux classifications appliquées estiment le massif plutôt comme médiocre (classe IV). Dans la zone sous l'eau, des observations visuelles ont été effectuées avec un équipement spécial (sous-marin) mais les mesures n'étaient pas possibles et la zone n'a pas été classée.

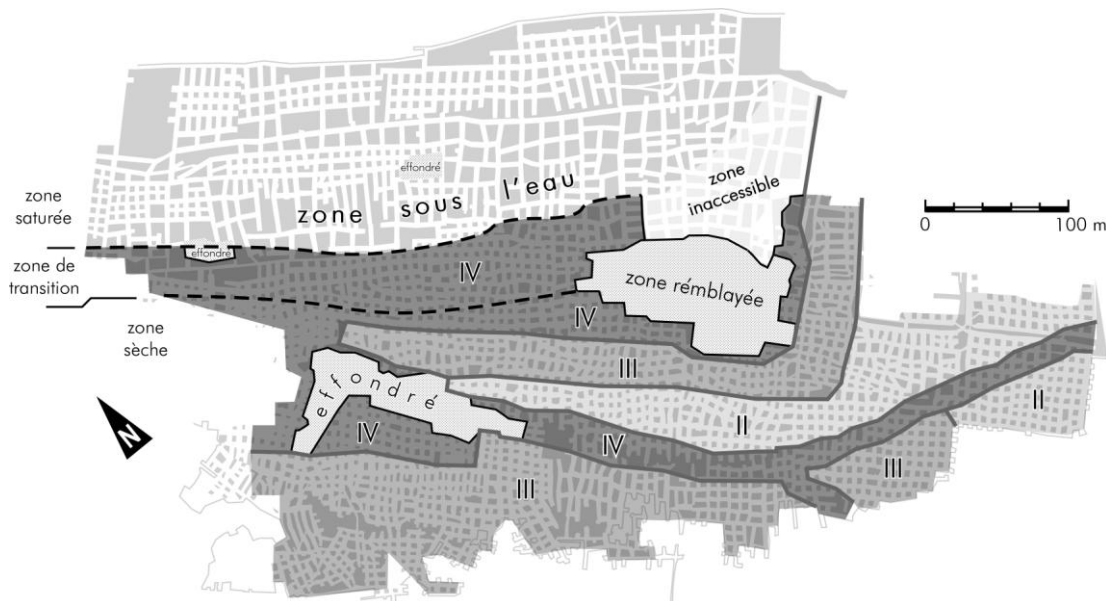


Figure 7. Caractérisation sur le secteur étudié des différentes zones géomécaniques de qualités de rocher : II - Bon ; III – Moyen, iV - Médiocre et les zones effondrées .

## 5. Conclusions

Les contextes géologique et géomécanique dans la carrière de la Malogne ont été étudiés par des observations et des mesures in situ. Le travail s'est focalisé essentiellement sur l'estimation des propriétés géomécaniques et la classification du massif en se basant sur le GSI et le  $RMR_{89}$ . Les systèmes de classification géomécanique utilisés donnent une qualification de la zone étudiée sur base de l'évaluation quantitative de différents paramètres. Du fait de la variété des conditions dans la carrière ainsi que de la qualité du massif, trois zones géomécaniques ont été identifiées sur la partie étudiée. La qualité varie de bon et moyen (typiquement dans la zone sèche) à médiocre (pour la zone de transition). L'approche utilisée donne une estimation pertinente des conditions sur le site de la carrière de la Malogne qui ont été confirmées par les observations in situ. Les résultats présentés pourraient être utilisés comme indicateurs pour préciser les zones d'aléas dans la carrière de la Malogne, ce qui permettrait de proposer des mesures préventives à envisager si nécessaire.

## **6. Remerciements**

Cette recherche a été réalisée avec le soutien du Fonds Européen de Développement Régional dans le cadre du projet Interreg FWVI « RISSC ». Les auteurs remercient l'équipe de l'ASBL Projet Malogne pour leur soutien pendant les travaux sur le terrain.

## **7. Références bibliographiques**

- Bieniawski Z. T. (1989). Engineering rock mass classifications. A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering. J. Wiley, New York, 251 p.
- Brady B., Brown, E. (2005). Rock mechanics for underground mining. Kluwer, 628 p.
- Cellule Aide et Conseils Effondrements (CACEff) (2015). Carrières souterraines de la Malogne à Cuesmes (Mons) - Effondrement généralisé survenu le 22/04/2015 le long de la limite ouest de l'emprise de la ligne de chemin de fer 96A (Mons-Quévy-Paris) - Rapport d'intervention et de recommandations. Rapport interne CACEff-009/01, SPW.
- Funcken L., Welter P. (2004). Inspections et mesures permanentes dans les carrières souterraines de la Malogne à Cuemes (Mons) en Belgique. JNGG, France, pp 347-354.
- Hoek E., Brown E. (1998). Practical estimates of rock mass strength. *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 34 (8), pp. 1165-1186.
- Hoek E, Marinos P, Marinos V. (2005). Characterization and engineering properties of tectonically undisturbed but lithologically varied sedimentary rock masses. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.* 42, pp. 277-285.
- Hutchison D., Diederichs M. (1996). Cablebolting in Underground Mines. BiTech, 403 p.
- Kheffi A., Pacyna D. (2016). Cartographie des aléas sous-sol, base d'une politique de prévention des risques en Wallonie (Belgique) - Application aux cavités souterraines. JNGG, Nancy, France.
- Kheffi A., Pacyna D. (2016). Élaboration de cartographies de zones d'aléas de mouvement de terrain engendrés par les objets souterrains connus de Wallonie. Rapport méthodologique 0326/2018 « Aléas de mouvement de terrain », 130 p.
- Leclercq F., Bouko P. (1985). La Malogne. Guide à l'exposition « La Malogne. Centenaire de la découverte du Hainosaure » (1885-1985), 63 p.
- Marinos V., Marinos P., Hoek E. (2005). The geological strength index: Applications and limitations. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, vol. 64, n° 1, pp. 55-65.
- Pacyna D. (1992). Environnement et mise en valeur du site des carrières souterraines de la Malogne (Cuesmes). TFE, Faculté Polytechnique de Mons, Belgique, 105 p.
- Robaszynski F., Dhondt A., Jagt J. (2001). Cretaceous lithostratigraphic units (Belgium). *Geol. Belgica.* 4, pp. 121-134.
- SPW Agriculture, Ressources naturelles et Environnement. (2019). Etat des nappes d'eau souterraine de la Wallonie. D/2019/11802/08, 54 p.
- Ulusay R., Hudson J. (2007). The complete ISRM suggested methods for rock characterization testing and monitoring: 1974-2006, Comm. on testing methods, ISRM, pp. 3-55.
- Vandycke S. (1987). Tectonique et sédimentation à la limite Crétacé-Tertiaire dans le Bassin de Mons. Etudes Souterraines des Phosphatières de la Malogne. Mém. de licence en Sc. géol. et minér., ULB, 75 p.
- Vandycke S. (1992). Tectonique cassante et paléo-contraintes dans les formations crétacées du nord-ouest européen. Implications géodynamiques. Thèse Univ. Paris VI, Mém. Sc. Terre Univ. Curie, n° 92-02, 179 p.