

## INFLUENCE DES TRAVAUX MINIERS SUR L'ÉVOLUTION DU KARST DÉVELOPPÉ SUR LES SULFATES, DE L'OUEST DE L'UKRAINE

LESYA SHKITSA\*

**RÉSUMÉ.** Dans la province riche en sulfates de l'ouest de l'Ukraine, les changements du régime hydrogéologique induites par les activités technologiques reviennent aux travaux miniers qui ont provoqué l'intensification de l'extension du karst et d'effondrements des terrains. On montre les conditions hydrochimiques et les facteurs qui contrôlent le développement du karst dans la région.

Dans l'ouest de l'Ukraine, au contact de la plate-forme Est-Européenne avec la courbure de Peredkarpattia, il existe des roches de sulfate de calcium: les gypses et les anhydrides.

La formation de la structure géologique de la région date du Miocène moyen. Elle y a commencé il y a environ 10-12 millions d'années. Pendant des millions d'années, après l'entassement des sulfates, les eaux souterraines qui s'y sont infiltrées ont lavé le labyrinthe de grandes et petites grottes, et ont créé le réseau de cavernes et d'autres formes du relief karstique. Les gisements de soufre sont liés étroitement à l'horizon nommé du «gypsoanhydrite». D'après les résultats des travaux d'exploitation et de prospections géologiques, accomplis dans les limites du territoire étudié, on a distingué la province soufrée de Peredkarpattia (Fig.1). La structure en blocs tectoniques de la zone de contact de la plate-forme et de la courbure contrôle la profondeur différente où se trouvent actuellement les calcaires. C'est pourquoi une partie des gisements dont les profondeurs sont les moins grandes est exploitée à ciel ouvert, l'autre, plus profonde, est exploitée à l'aide de la méthode par dissolution *in situ*.

Dans la couche de gypsoanhydrites, le karst se forme en général suivant le système de fissures, car par leur nature, ces roches sont monolithes et consistantes. Le développement de la fracturation lithogénétique tectonique des fissures d'altération dans l'assise où le karst se forme, permet de comprendre la direction du ruissellement karstique et la condition de son alimentation, par ruissellement permanent ou périodique et par les eaux météoriques.

Les systèmes de fracturation à l'intérieur de la couche de gypsoanhydrites représentent les voies réelles du ruissellement karstique et le facteur qui contrôle le développement du karst profond. Par ces voies, dans la couche de roches divisée en blocs par les déformations tectoniques et par l'érosion, dans les conditions d'un aérage puissant, l'échange d'eau rapide se produit et il est favorable pour le développement intensif du karst. La corrélation des horizons aquifères dans les couches qui recouvrent et qui s'étendent sur les gypsoanhydrites favorise aussi la formation des karsts.

---

\* Université Nationale Technique du Pétrole et du Gaz de Ivano-Frankivsk (Ukraine)



Fig.1 – Localisation des régions à sulfates étudiées sur la carte de l'Ukraine

Les voies suivantes sont possibles:

- la traversée complète ou partielle de la couche des roches de sulfates, par la circulation de l'eau, qui forme le karst ouvert et semi-ouvert;
- l'absence de la traversée de la couche des roches sulfatées par la circulation de l'eau, qui forme le karst fermé, sous la forme de cavernes.

Suite du développement intensif des systèmes karstiques fissurés dans les gypsoanhydrides, des cavités considérables se forment dans la couche et sous la surface. En conséquence, il y existe l'affaissement et l'éboulement des roches dans ces cavités et la destruction de la structure des gypsoanhydrites proches de la surface.

L'existence du karst dans les dépôts de sulfates, en fonction de sa diffusion et de l'intensité de son activité, représente le plus grand danger pendant la mise en valeur du territoire. Les roches dans lesquelles le karst se développe sont couvertes de couches d'argiles et de sables. Les roches sus-jacentes ont une puissance inconstante, dans les limites de quelques dizaines de mètres. Selon la présence de telles ou telles roches dans la succession géologique et selon leur puissance on distingue des terrains qui peuvent affecter la surface.

Les travaux miniers ont toujours eu une influence nuisible sur l'environnement, surtout s'il s'agit des conditions géologiques difficiles. Si on considère le problème du karst technogène pour la région minière, on peut dire que c'est le territoire dans lequel les eaux ne traversent pas les couches des roches ou le karst se forme. Ça explique pourquoi dans les conditions naturelles, le karst se formait très lentement. En plus, le territoire était très peu bâti.

## INFLUENCE DES TRAVAUX MINIERES SUR L'ÉVOLUTION DU KARST DÉVELOPPÉ...

La situation a brusquement changé au cours des dernières dizaines d'années quand le chargement technogène sur le milieu géologique s'est agrandi. Les villages et les voies de communication, construits sur les terrains des couches sulfatées, se sont trouvés sous la menace de la destruction.

L'extraction du soufre à ciel ouvert a la plus grande influence sur le développement du karst. Cette influence technogène comprend: l'extraction des roches sur une superficie a peu près de 10 km carrés et la nécessité du pompage des eaux souterraines, formant ainsi un cône de dépression dont le rayon est de 18 km; le changement des bras des rivières et la création des systèmes de drainage; la construction des stockages d'eau qui évitent l'inondation de la région, la construction des stockages de déchets d'extraction de l'usine de soufre, des chemins de fer des autoroutes, de conduites ont également participé à ce processus.

La mise en valeur du gisement de soufre a commencé la nouvelle étape technogène du développement du karst. Sous l'influence de l'assèchement de la carrière le cône de dépression s'est formé à 90 m de profondeur, donc la vitesse d'infiltration de l'eau a augmenté. Des éboulements des roches au-dessus des poches karstiques ont commencé. Ils étaient conditionnés par l'élargissement des poches karstiques et par l'augmentation de la pression géostatique après l'assèchement des roches.

Le sulfate de calcium se trouve sous la forme d'anhydrite et de gypse. Le gypse et l'anhydrite d'origine sédimentaire, sont des roches salines de la famille des évaporites. Ce sont des sulfates de calcium de formule chimique, à l'état pur:

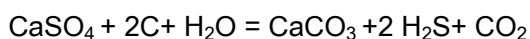
-gypse:  $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$  (CaO: 32,6%;  $\text{SO}_3$ : 46,5%;  $\text{H}_2\text{O}$ : 20,9%);

-anhydrite:  $\text{CaSO}_4$  (CaO: 41,2% ;  $\text{SO}_3$ : 58,8%)

Sous la pression le gypse dégage l'eau et devient anhydrite. L'eau saturée de sulfate entre dans les couches collectrices. A la profondeur de 150 m et plus on ne trouve que de l'anhydrite. A l'abaissement de la pression, l'anhydrite prend de l'eau et au long des fissures apparaissent les cristaux de gypse.

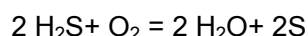
La solubilité du gypse augmente avec l'augmentation de la température, et la solubilité de l'anhydrite, diminue. Cela provoque la diminution de l'anhydrite solubilisée dans les eaux souterraines quand la température augmente. Au contraire, à la sortie de l'eau chaude des horizons profonds, par refroidissement, elle devient agressive envers le gypse. L'apport dans la solution des autres ions augmente la transition dans la solution de sulfate de calcium.

Le balance entre l'eau et les roches sulfatées est déviée par les bactéries sulfato-réductrices. Elles décomposent l'ion sulfate dans les eaux sans oxygène et utilisent l'oxygène des sulfates pour l'oxydation de la matière organique en dégageant dans l'eau l'hydrogène sulfuré et le gaz carbonique.



Le gaz carbonique soluble dans l'eau favorise la dissolution de la calcite et l'augmentation du contenu en ion-hydrocarbonate. Ainsi, la présence des sulfates dans l'eau mène aussi à la dissolution des calcaires. Donc, la composition

chimique des eaux souterraine se stabilise. Si l'eau, qui s'est formée en résultat de dissolution du gypse et de l'activité des bactéries sulfato-réductrices, se mêle avec l'eau oxygénée l'hydrogène sulfuré peut l'oxyder en soufre:



Pendant l'oxydation de l'hydrogène sulfuré l'environnement devient plus alcalin et la calcite précipite dans l'eau, en constituant un minerai sulfureux-calcitique.

La vitesse de dissolution des sulfates dans l'eau est très grande. L'expérience d'assèchement des carrières de soufre a montré que pendant l'infiltration l'eau devient saturée en sulfates.

L'eau des gisements de soufre est le mélange des eaux qui se forment à partir de la dissolution des roches, avec les eaux des mers anciennes. Cela est prouvé par l'augmentation de la minéralisation et du contenu en sodium et en chlore, avec la profondeur.

Les eaux de drainage de la carrière sont le résultat de la dissolution des roches de la formation sulfate-carbonate. La minéralisation des eaux atteint 3,6 g/l, comprenant 1,6 g/l d'ion sulfate. La minéralisation diminue à 2-2,5 g/l et le contenu en sulfates à 1,0-1,2 g/l après la dilution par les eaux atmosphériques. En dehors de cela, l'eau contient 35-75 mg/l d'hydrogène sulfuré. L'oxygène est absent dans l'eau. Ainsi, si on ne prend pas en considération l'hydrogène sulfuré, on pompe de la carrière près de 76 milliers m<sup>3</sup>/jour, qui contiennent 1600 mg/l d'ion sulfate et 500 mg/l de calcium, c'est-à-dire que chaque litre d'eau transporte 2,1 g de gypse.

En un jour on transporte  $76 \times 2.1 = 159,6$  t de sulfate de calcium, c'est-à-dire 217 t de dihydrate. La compacité de gypse est 1.32 t/ m<sup>3</sup>, le volume des roches dissoutes est 164 m<sup>3</sup>/jour.

En un an on transporte 60 000 m<sup>3</sup>, en 30 ans après le commencement de l'assèchement on a transporté 1.8 m m<sup>3</sup> de gypse. La surface de la diffusion du gypse dans la zone du cône de dépression est égale 75 km<sup>2</sup>. Si le mur des gypses se dissout régulièrement, le massif entier de roches baisse à 2.4 cm. Mais l'infiltration d'eau n'est pas régulière. Si on construit le réseau selon les données de surveillance, on pourra déterminer la valeur de l'affaissement sur chaque zone d'infiltration à part.

On peut comparer ce volume du gypse dissous avec le volume des cônes de dépression qui se sont formés pendant l'assèchement. La profondeur moyenne des cônes est de 10 m, le rayon est 15 m, le volume est 2000 m<sup>3</sup>. Après avoir partagé le volume du gypse dissous en 900 cônes, ce qui n'est pas loin de la réalité on arrive au volume total calculé. La dissolution des gypses est l'un des processus essentiels qui provoquent les effondrements.

L'assèchement de la carrière a activé la circulation des eaux souterraines, et entraîné l'augmentation de la tension géostatique dans le massif des roches. Le régime du ruissellement qui était autrefois régulier, a été modifié par le système de barrages. Les changements technogènes du régime hydrogéologique

ont provoqué l'intensification des karsts et leur manifestation sous la forme des effondrements de terrain. En conséquence, comme la mesure du danger de karst n'était pas définie, beaucoup de bâtiments neufs ont été ruinés, les autres ont été fissurés. Tout cela a provoqué la tension sociale. Ici on a montré les changements essentiels qui étaient provoqués par les travaux miniers pendant la période d'exploitation de la mine et qui a une influence négative sur l'environnement.

Donc, le problème est comment on peut arriver à soutenir une condition stable pour pouvoir déterminer la méthode et la possibilité de réhabilitation. Il y a toujours une liaison entre la réhabilitation finale, la stabilité hydrologique dans la région et la contamination de l'environnement.

Le souci pour la réhabilitation du site est motivé par les facteurs divers de la région, tel que l'existence des villages autour du site. Ces villages sont dépendants de l'eau des rivières et aussi de l'eau souterraine pour leur alimentation. Donc l'impulsion est vers la prévention des effondrements de terre et la pollution des eaux qui peuvent causer des problèmes grave à la population dans la région concernée.

Pour garantir la stabilité écologique il faut arrêter la contamination de l'eau du bassin de la rivière par l'eau minéralisée de la carrière, donc réduire l'infiltration de l'eau souterraine de l'horizon karstique dans la carrière.

Les effondrements karstiques liés à l'érosion de l'horizon sulfaté sont un problème régional. En dehors les autres problèmes, dans les propriétés agricoles les risques les plus importants liés à ces effondrements sont: l'effondrement d'habitation; la rupture de barrages hydrauliques; la rupture de la digue à stériles. Comme nous ne disposons pas de suffisamment de détails concernant la géologie des terrains qui se trouvent en dessous ces ouvrages, il nous est impossible de faire ici une proposition concrète pour chacun d'eux.

Toutefois, il semble impératif et urgent de connaître ces caractéristiques et de prévoir un renforcement de ces ouvrages par injection de coulis de sable (rejets d'usines), si possible mélangé à des cendres volantes (de centrale thermique). Ce traitement préventif est absolument nécessaire si l'on veut diminuer le risque à moyen terme pour les habitants.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Rudko G.I., Shkitsa L.Y. Ecological safety and rational utilization of nature within mining, oil and gas complexes: Monograph.-Kyiv, "Nichtava", 2001.-528p.
- Lesya Shkitsa. Projet de réhabilitation de la mine «Cirka» dans un contexte hydrogéologique karstique difficile (Région de Yavoriv - Ukraine). CESSEM. Alès – France. 2001.
- Bonnet M., Palos H., Thiery D. 1982. Apport a la connaissance du comportement hydrodynamique d'un karst. Documents BRGM N45, p.137-146.