

## Effet de cavitation lors de la constitution de formes karstiques secondaires

Penka MAGLOVA & Alexey STOEV  
(traduit du russe par S. VI. BAKALOVA)

### Résumé

L'eau qui tombe goutte à goutte influence les processus d'où naissent des formes karstiques secondaires telles que les dendrites. Cet article montre le rôle des jets cumulatifs provoqués par la chute des gouttes dans divers volumes d'eau. Il analyse la cinématique de la goutte d'eau et le rapport entre les paramètres cinématiques, la hauteur du jet cumulatif et l'effet final.

L'auteur discute l'influence des paramètres microclimatiques et justifie la possibilité de création de nomogrammes qui relient les phénomènes quantitatifs observés et les paramètres cinématiques.

### Abstract

*Production of karst secondary forms - Cavitation effect.*

*The influence of dripping water on secondary karstforming processes such as dendrites has been investigated. The role of cumulative jets caused by the falling drops in different water volumes is shown. Kinematic of the water drop, connection between kinematic parameters and height of the cumulative jet, and final effect, have been analyzed. The influence of the microclimatic parameters on the form and evolution of the "egouttatic hollows" and dendrites and their informative feed-back have been discussed. The possibility of nomograms creations which connect examined quantitative phenomena and kinematic parameters has been grounded.*

### КАВИТАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ СТРУКТУРЕ ВТОРИЧНЫХ КАРСТОВЫХ ОБРАЗОВАНИЙ.

Циркуляция подземных вод в карстовых районах совершается на микро и макроуровне. Их гидродинамика на макроуровне сегодня исследована почти подробно. Не так стоит вопрос о движении воды в зоне микротрещин известняка и ее динамики вследствие существования так называемых каплющих форм — разных типов сталактитов, потолочных трещин и другие. Давление пара на поверхность капли зависит от его радиуса и определяется по уравнению Кельвина. В данном случае кинематическое поведение капли переходит через несколько фаз — неустойчивость и раздробленность капли, взаимодействие с твердой или жидкой поверхностью, трансформирование ее кинетической энергии в кумулятивную струю с определенными параметрами. Отрываясь капля деформируется под влиянием окружающего потока воздуха. Вначале капля принимает форму диска, потом переходит в тороидальное кольцо, очень неустойчиво по сравнению к начальной, нарушенной форме ее поверхности. Следует цепная реакция, которая делит каплю в мельчайшие части и образуется тороидальное кольцо из раздробленных капель.

Качественно и количественно исследовано падение водяной капли и образование кумулятивной струи в небольшом водяном бассейне /синтровое озеро/. Исследована связь морфологических особенностей вторичных карстовых образований и синтрового озера с высотой, массой и наклоном кумулятивной струи.

Исследована связь между высотой и наклоном кумулятивных струй и плотностью вторичных карстовых образований типа „ дендрит". Показана недвусмысленность роли кумулятивной струи при переносе кальциевого карбоната с насыщенного раствора синтрового озера.

## I. INTRODUCTION

La circulation des eaux dans les régions karstiques s'effectue à un micro-niveau et à un macro-niveau. Leur hydrodynamique est étudiée à peu près en détail au macro-niveau; par contre, on ne connaît pas suffisamment le problème du déplacement de l'eau dans les micro-fissures, sa dynamique dans les concrétions calcaires (stalactites de toutes sortes, fissures aux voûtes des grottes, etc.).

## II. APPROCHE DE LA THÉORIE DE L'ÉCOULEMENT DES GOUTTES

Une goutte est une très petite quantité de liquide, fixée dans un état d'équilibre par une surface symétrique. Les gouttes se forment à la suite d'un lent écoulement dans une minuscule ouverture. Sous terre, en présence de conditions météorologiques favorables, elles peuvent résulter de la condensation de la vapeur sur la paroi supérieure. Leur forme dépend de la tension superficielle et des forces extérieures appliquées (par exemple l'intensité de la pesanteur). Les grosses gouttes sont sphériques, à condition que leur densité coïncide avec celle du milieu environnant. Pratiquement, de telles conditions n'existent pas sous terre, mais les gouttes qui tombent (comme celle de pluie) sont écrasées d'un côté à cause de leur poids, de la tension superficielle et de l'influence du courant d'air rencontré. La forme et la taille des gouttes s'écoulant d'une formation karstique secondaire de type "tube capillaire" dépendent du diamètre du tube, de la tension superficielle et de la densité de l'eau. La pression de la vapeur à la surface d'une goutte dépend de son rayon et peut être calculée à l'aide de l'équation de Kelvin (PROKHOROVA, 1990).

Dans ce cas, le comportement cinématique de la goutte passe par plusieurs étapes: instabilité et morcellement, influences réciproques avec une surface solide ou avec une surface liquide, transformation de l'énergie cinétique en jet cumulatif aux paramètres déterminés. En se détachant, la goutte se déforme à cause du courant d'air qui l'entoure. Elle commence par prendre la forme d'un disque, puis devient un anneau torique qui est très instable par rapport aux irrégularités initiales sur la surface. Il s'en suit une réaction en chaîne qui divise la goutte en plus petits éléments; l'anneau torique est formé de ces gouttelettes (GUÉGOUZIN, 1973).

D'autre part, le jet cumulatif des liquides et de l'argile est un phénomène fréquent dans la zone souterraine. Le mot "cumulation" provient du latin "cumulatio" (action

de cumuler ou d'entasser) et veut littéralement dire augmenter ou renforcer un effet lorsque d'autres qui lui sont pareils s'y ajoutent. Les ouvrages de physique décrivent en détail la dynamique et les équations essentielles qui présentent le processus de cumulation (LAVRENTIEV & CHABAT, 1977). MATER (1989), bien que de façon élémentaire, examine les détails du problème de la cumulation sphérique. Si une goutte de densité  $S$ , de rayon  $r$  et de vitesse initiale nulle tombe d'une hauteur  $h$  sur une nappe d'eau, son énergie cinétique au moment du contact avec la surface vaut:

$$E_k = m_k g h = \delta V_k g h \quad (1)$$

où  $m_k$  et  $V_k$  sont la masse et le volume. En considérant la goutte sphérique à son approche, son volume vaut alors  $V_k = 4/3 \pi r^3$ ; par conséquent, son énergie cinétique fait  $E_k = 4/3 \pi S g r^3 h$ . Tombée dans l'eau, la goutte disparaît. À part l'énergie  $E_k$ , le liquide obtient l'énergie de la surface de la goutte, soit

$E_s = a S_k = 4 \pi a r^2$ , où  $a$  est le coefficient de tension superficielle et  $S_k$  la surface de la goutte. Il est facile de conclure que, dans les conditions de l'expérience,  $E_k \gg E_s$ ; on peut donc négliger  $E_s$  et accepter que la goutte qui tombe ne transmet au liquide que son énergie  $E_k$ .

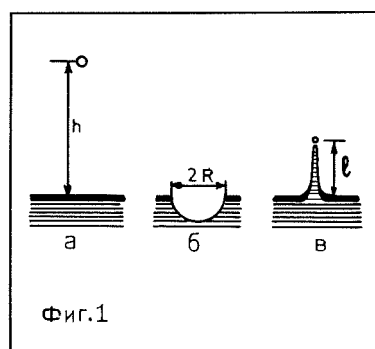


Figure 1.

Si l'on admet que cette énergie est complètement consommée uniquement pour former dans l'eau la concavité hémisphérique de rayon  $R$ , cette énergie provenant de la goutte se transmet ensuite entièrement au jet cumulatif (Fig. 1). Pour qu'un jet cylindrique de rayon  $r$  faut qu'il accomplisse un travail  $A_1$  opposé à la force de tension superficielle et un travail  $A_2$  opposé à l'intensité de la puissance; ainsi le travail total vaut  $A = A_1 + A_2$ .

$A_1 = \sigma S$ , où  $S$  est la transformation de la surface de l'eau suite au jaillissement du jet cylindrique (Fig. 2).

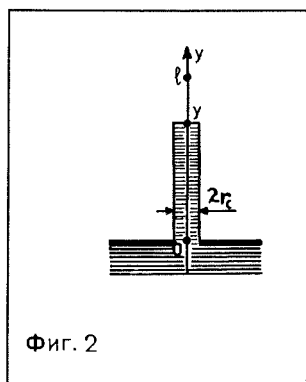


Figure 2.

Cette valeur  $S$  représente la surface latérale du cylindre:  $S = 2 \pi r_c l$ , d'où

$$A_1 = 2\pi\sigma r_c l \quad (2)$$

Déterminer le travail  $A_2$  est un peu difficile. Sur le jet d'eau cylindrique agit l'intensité de la puissance  $P(y) = \delta g V_c(y)$ , où  $V_c(y)$  est le volume du jet. Puisque  $V_c = \pi r_c^2 y$ , alors  $P(y) = \pi \delta g r_c^2 y$ . On peut admettre que cette force est constante dans le volume élémentaire du liquide, si bien que le travail élémentaire nécessaire pour faire remonter le jet d'eau cylindrique vaut:

$$dA_2 = P(y)dy = \pi \delta g r_c^2 y dy \quad (3)$$

Il faut que le jet d'eau soit repoussé du niveau 0 à une hauteur  $l$ , donc l'intégration doit s'effectuer dans les limites entre 0 et  $l$ :

$$A_2 = \int_0^l dA_2 = \int_0^l \pi \delta g r_c^2 y dy = \pi \delta g r_c^2 [y^2/2]_0^l = \frac{1}{2} \pi \delta g r_c^2 l^2 \quad (4)$$

Comme  $A = A_1 + A_2$ , nous avons

$$A = 2\pi\sigma r_c l + \frac{1}{2}\pi\delta g r_c^2 l^2 \quad (5)$$

Mais c'est le travail effectué par la goutte qui est tombée; par conséquent les expressions (1) et (5) sont

égales. Il en résulte une équation du deuxième degré concernant  $r_c l$ :

$$\frac{1}{2}\pi\delta g (r_c l)^2 + 2\pi\sigma (r_c l) - 4/3\pi\delta g r^3 h = 0 \quad (6)$$

Il est clair que la solution de cette équation revient à:

$$r_c l = [4\sigma^2/\delta^2 g^2 + 8/3r^3 h]^{1/2} - 2\sigma/\delta g \quad (7)$$

(on laisse tomber la racine négative).

On peut calculer ensuite la longueur du jet  $l$  qui dépend de la hauteur d'où tombent les gouttes, car on connaît, pour l'eau,

$$\sigma = 0,073 \text{ N/m} \text{ et } \delta = 10^3 \text{ kg/m}^3.$$

### III. EXPÉRIMENTATION.

Dans une petite galerie (2,50 x 1,00 x 1,50 m) de la grotte de Cristalna, près du village de Dobrostan de la région de Plovdiv (Bulgarie), se trouve un lac. On y a aménagé un polygone d'étude du comportement des gouttes tombant des stalactites sur la surface du lac. Nos observations constatent que les gouttes se suivent particulièrement vite au printemps et provoquent des jets cumulatifs de différentes hauteurs. Au premier abord, ceci paraît invraisemblable, vu que, du corps d'un stalactite, les gouttes qui s'écoulent ont une même masse et une même vitesse initiale, et parcourent une même distance jusqu'à la surface de l'eau. Nos études complémentaires montrent néanmoins que c'est dû aux vaguelettes que provoquent à la surface les chutes de gouttes.

Hypothétiquement, la première goutte provoque, là où elle tombe, une vague qui se diffuse; cette vague atteint le flanc de la cavité et est réfléchi. L'interférence entre la première vague et la vague de réflexion conditionne la formation d'autres vagues, à des moments déterminés. Les résultats de nos expériences prouvent que la hauteur du jet cumulatif dépend de l'endroit où tombe la deuxième goutte (ou chacune des suivantes): dans le creux ou dans la vague même.

D'autre part, dans les limites de la hauteur de la galerie (de 0 à 3 m), la vitesse de la goutte au moment du contact avec la surface de l'eau peut être remplacée par  $v_0 = 0$  jusqu'à  $v_n = 27,7$  m/s (on ne tient pas compte de la résistance de l'air). A une hauteur de 0,02 à 0,05 m, commence la formation de creux sphériques dans la nappe d'eau, sans qu'il y ait un jet cumulatif. Cela

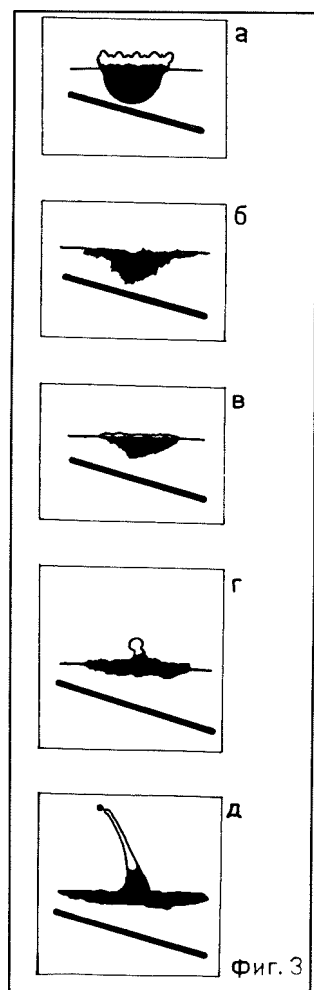


Figure 3.

s'explique par le fait que le creux s'efface lentement. A une hauteur plus grande (vers 0,05 m), des jets cumulatifs petits et minces commencent à surgir. A plus de 0,60 m, la longueur des jets n'augmente plus, mais leur diamètre s'accroît; on a des jets d'eau plus épais, toujours surmontés d'une nouvelle goutte. En tombant, cette goutte crée de nouveau un mince jet cumulatif, souvent plus long que le jet initial. Les gouttes qui tombent de plus de 2,5 m ne provoquent plus de jets cumulatifs; sur la surface de l'eau, apparaissent alors des bulles. Des effets intéressants s'observent lorsque les gouttes tombent près de la paroi de la galerie, où le fond du lac est en pente et la profondeur faible (0,10 à 0,25 m). La dimension du jet cumulatif augmente si les gouttes tombent obliquement; dans ce cas, les gouttes

arrivant sur la surface horizontale de l'eau y font non pas un creux sphérique, mais un creux conique plus effectif en énergie; la base du creux conique est légèrement asymétrique. La verticale qui engendre le cône transmet au jet plus de mouvement, à la suite de quoi le jet s'écarte de la verticale (Fig. 3). Ces changements qualitatifs sont confirmés par les résultats quantitatifs théoriques et expérimentaux (LAVRENTIEV, 1957).

Lors de notre expérimentation, nous nous sommes proposé d'étudier l'influence du jet cumulatif sur la formation des dendrites disposées sur les parois de la galerie du lac. On a calculé la densité des stalactites et des dendrites (Fig. 4) et on a constaté que la densité des dendrites va en augmentant vers les stalactites situées plus bas (Fig. 4, secteur 3). Si l'on suit les lignes isobares du lac, on voit que la densité est en rapport avec l'inclinaison (environ 10 à 30°) et augmente quand la profondeur diminue. La densité stratifiée des dendrites aux endroits plus élevés (à tous les 0,20 m) jusqu'à  $h = 1$  m prouve que les valeurs maximales sont à une hauteur comprise entre 0,40 et 0,60 m (Fig. 5).

En comparant la répartition de ces maximums aux hauteurs des jets cumulatifs provoqués par les gouttes tombant des formations de la voûte, il est évident que la plus grande quantité d'eau vient des secteurs d'angle où la densité des formations secondaires est la plus grande (Tabl. 1). Ce transport d'eau saturée en carbonate de calcium a une importance décisive pour la genèse et l'évolution des dendrites.

#### IV. MICROCLIMAT ET CUMULATION.

Ce qui caractérise le jet cumulatif, c'est son intensité différente par rapport à d'autres processus et mécanismes physiques. Notre tentative d'établir un rapport entre hauteur et diamètre du jet d'une part et paramètres microclimatiques de la grotte d'autre part, a échoué. La différence entre la température d'été et celle d'hiver dans cette partie de la grotte n'est que de 0,8 °C. L'humidité relative y est constante (99,4 %) et crée des conditions d'évaporation toujours les mêmes pour les gouttes qui suintent des stalactites. Aucun courant d'air dans la galerie n'a été signalé.

Le nombre des gouttes d'eau reste identique toute l'année; ce qui change uniquement est leur intensité, à la fin de l'hiver à la fonte des neiges et en automne à cause des pluies.

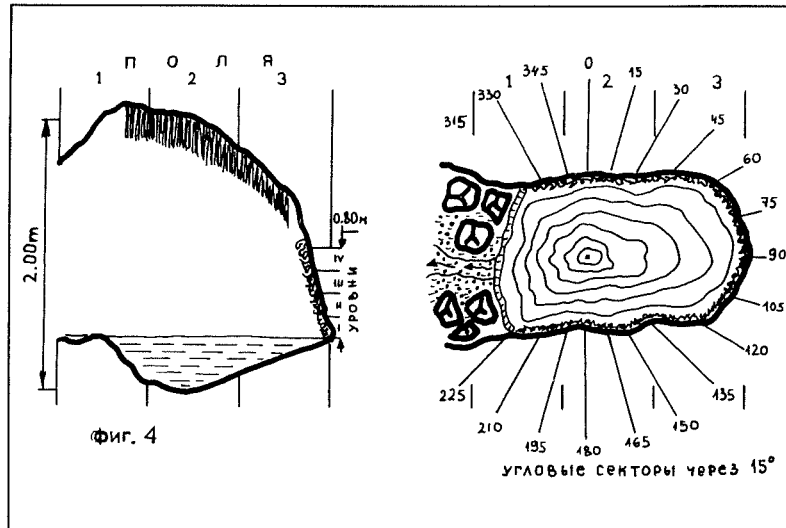


Figure 4 : Densité de stalactites et de dendrites  
A. Coupe . Secteurs 1, 2 et 3 B. Plan. Secteurs (1, 2 et 3) et orientation.

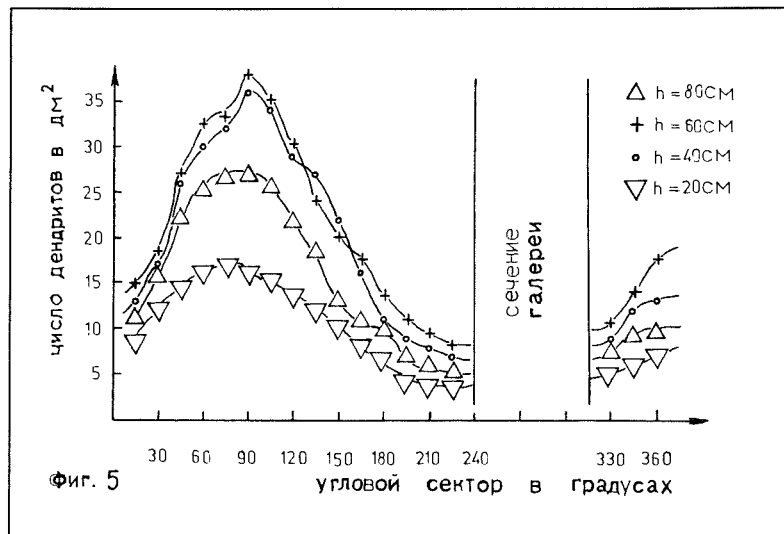


Figure 5 : Nombre de dendrites par  $dm^2$  (en ordonnée), secteur d'angle en degrés (en abscisse), hauteur (signes conventionnels). Entre 240° et 315°, section de la galerie.

Secteur d'angle en degrés	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210	225	330	345	360
Hauteur du jet cumulatif en cm	20	22	25	35	45	61	60	52	43	38	37	28	21	10	8	12	16	20
Densité moyenne de dendrites par $dm^2$	13	17	26	30	32	36	34	29	27	22	16	11	9	8	7	9	12	13

Tableau 1 : Relation entre densité des dendrites, hauteur du jet cumulatif et secteur d'angle.

**V. CONCLUSION.**

A. On a étudié la quantité et la qualité des gouttes d'eau qui tombent des concrétions, ainsi que la formation du jet cumulatif dans un petit bassin d'eau.

B. On a cherché le rapport entre les caractéristiques morphologiques des formations karstiques secondaires et du lac, et la hauteur, la masse et l'inclinaison du jet cumulatif.

C. On a étudié le lien entre la hauteur et l'obliquité du jet cumulatif et la densité des formations karstiques secondaires du type "dendrites". Le rôle incontestable du jet cumulatif dans le transport du carbonate de calcium a été démontré.

**VI. REMERCIEMENTS.**

Les auteurs remercient les membres du club spéléologique de Stara Zagora pour leurs efforts pleins d'abnégation pendant l'année où ils les ont aidés dans leur expérience.

**VII. BIBLIOGRAPHIE**

- GUÉGOUZIN, Ia., 1973, *Kaplia*, M. Naouka.  
 LAVRENTIEV, M. & CHABAT, B., 1977, *Problemi guidrodinamiki i ikh matematicheskie modeli*, M. Naouka.  
 LAVRENTIEV, M., 1957, *Koumouliativnii zariad i Printsipi evo raboti, Ouspeki matematicheskikh naouk*, vip. 4/76, tom. 12.  
 MATER, V., 1989, *Koumouliativnii efekt v prostikh opytakh*, M. Naouka.  
 KIKOINA, I. K., (d. red.), 1976, *Tablitsi phizicheskikh velitchin*, Spravotchnik, "Atomizdat".  
 PROKHOROVA, A. M., (pod. red.), 1990, *Phizicheskaiia Entsiklopedia*, t. 2., Sov. Ents.

Adresses des auteurs:

Penka Maglova  
 Institut de Recherches cosmiques  
 Académie bulgare des Sciences  
 BG-6000 STARA ZAGORA  
 BULGARIE

Alexey Stoev  
 Observatoire astronomique  
 et planétarium Y. Gagarine  
 BG-6000 STARA ZAGORA  
 BULGARIE