



## Les Cahiers d'Outre-Mer

Revue de géographie de Bordeaux

223 | Juillet-Septembre 2003

Pression anthropique et environnement en Amérique latine

---

# Cenotes et trous bleus, sites remarquables menacés par l'écotourisme

Jean-Noël Salomon

---



### Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/com/815>

DOI : 10.4000/com.815

ISSN : 1961-8603

### Éditeur

Presses universitaires de Bordeaux

### Édition imprimée

Date de publication : 1 juillet 2003

Pagination : 327-352

ISSN : 0373-5834

### Référence électronique

Jean-Noël Salomon, « Cenotes et trous bleus, sites remarquables menacés par l'écotourisme », *Les Cahiers d'Outre-Mer* [En ligne], 223 | Juillet-Septembre 2003, mis en ligne le 13 février 2008, consulté le 01 mai 2019. URL : <http://journals.openedition.org/com/815> ; DOI : 10.4000/com.815

---

Ce document a été généré automatiquement le 1 mai 2019.

© Tous droits réservés

---

# Cenotes et trous bleus, sites remarquables menacés par l'écotourisme

Jean-Noël Salomon

---

- 1 Le terme de cenote vient de l'ancien maya *tz'onot* (= cavité avec de l'eau). Par définition un cenote contient de l'eau car il donne regard sur la nappe aquifère régionale. À la différence des gouffres et autres dolines d'effondrement, les cenotes ne donnent pas passage à des conduits vadoses. Cependant il peut arriver qu'en fonction des fluctuations du toit de la nappe, ils soient momentanément asséchés.
- 2 Ce terme est plus précis que le vague "*sinkhole*" de la littérature anglo-saxonne, aussi a-t-il été utilisé relativement tôt dans la littérature et dans toutes les parties du monde : Floride (Thornbury, 1954 ; Stringfield et Le Grand, 1966) ; Bohême (Pohl, 1955) ; Nouveau Mexique (Sweeting, 1972) ; Canada (Brook et Ford, 1974) ; Sud-Ouest africain, Rhodésie, Transvaal (Marker, 1976) ; Madagascar (Battistini, 1964 ; Salomon, 1986), Nouvelle-Calédonie (Thomas, 1987) ; Australie (Sexton, 1965 ; Fairbridge, 1968) ; les îles Trobriand, de Nouvelle-Guinée (Ollier, 1975), etc. D'autres noms sont utilisés pour désigner les mêmes morphologies, tels "*sartenejas*" (= poëllons) au Yucatan, ou "*casimbas*" (= pipes) à Cuba (photo 1). Lorsqu'ils se trouvaient en bordure littorale, les cenotes ont été totalement submergés par la remontée flandrienne. Ils ont alors longtemps intrigué les marins qui les avaient repérés et nommés "trous bleus" (*blue holes*). En effet, leur plus grande profondeur explique que la lumière spectrale étant davantage absorbée, leur coloration plus sombre (dans le bleu) les fasse trancher par rapport aux colorations "normales" du fond océanique, surtout si celui-ci est sablonneux et peu profond. Les trous bleus ont fait l'objet de multiples recherches comme aux Bahamas (Fairbridge, 1968 ; Wilson, 1994 ; Withaker, 1998 ; Palmer *et al.*, 1998), mais restent à entreprendre au Yucatan (Mexique), au Belize, dans le Pacifique, où de magnifiques exemples sont connus et, d'une façon générale, sur les anciennes plates-formes carbonatées recouvertes par la mer.

- 3 Les formes et les dimensions des cenotes varient énormément (Thornbury, 1954 ; Williams, 1969 ; Jennings, 1971 ; Sweeting, 1972 ; Salomon, 1986 ; Lloret et Ubach, 1993 ; Héraud-Piña, 1995) car ils sont très nombreux. Pour le seul Yucatan (Mexique) nous en avons recensé 874 (avec leurs noms), mais tous ne figurent pas sur cette liste, loin de là. Le Bushmangat (nord de la province du Cap - Afrique du Sud) est le plus grand gouffre noyé de la planète avec plus de 7 millions de m<sup>3</sup>. Le fond, mesuré par sonar, ferait 250 m de long sur 70 m de large ; quant à la profondeur atteinte (en plongée) elle est de - 283 m ! Comme les cenotes, les beaux trous bleus ont généralement entre 50 et 100 m de profondeur, mais ils peuvent parfois atteindre plus de 200 m comme au Deans Hole (Long Island, Bahamas).
- 4 Il s'agit généralement d'un puits vertical de forme plus ou moins cylindrique, ellipsoïdale ou tronconique et qui contient au fond une étendue d'eau. Celle-ci correspondant au toit de la nappe phréatique du niveau de base actuel (ou subactuel car celui-ci a pu varier légèrement au cours du temps, en relation avec les variations du niveau de la mer). Cela explique que parfois certains cenotes puissent être à sec, mais il s'agit de cas rares. Un cenote est avant tout un regard sur la nappe phréatique. Certains ont des conduits horizontaux menant aux profondeurs, mais souvent ces conduits sont bloqués par des effondrements. Beaucoup de cenotes donnent accès à des conduits et à des grottes noyées, mais ces derniers ne sont pas de vrais cenotes : le terme doit être réservé au seul puits vertical.
- 5 L'orifice d'accès du cenote s'est ouvert postérieurement à la formation de la cavité sous-jacente (photo de couverture). Quant aux parois, elles sont généralement à pic, franches, subcirculaires avec un rapport profondeur/diamètre supérieur à 1. Elles reflètent l'inégale sensibilité des strates par rapport à l'érosion (corrosion + éboulements gravitaires). Beaucoup ont des murs surplombants et certaines s'élargissent vers la base pour se prolonger par des conduits et des grottes. Les nombreux chaos de rocs jonchant le fond témoignent de leur effondrement. Les parois sont parfois ciselées de Wandkarren, mais pas toujours. Dans certains cas, la paroi laisse apparaître des conduits phréatiques décapités (Goulden's Hole, Australie du Sud) ce qui montre l'importance du rôle joué par les circulations phréatiques. Les hauts des parois sont généralement croulants et cariés indiquant localement une forte dissolution. En dessous, les parois sont plus régulières souvent surplombantes, traduisant des phénomènes d'effondrement (particulièrement nombreux à Andros, aux Bahamas).
- 6 Le fond est généralement plus haut au centre que sur les bordures, en raison des chaos de blocs éboulés lesquels forment souvent une sorte de pyramide. Avec le temps, le cenote, comme le trou bleu, sert de piège aux sédiments en transit et se colmate peu à peu. Il interdit ainsi l'accès aux conduits spéléologiques qui peuvent exister. Certains cenotes sont très profonds avec des lacs pouvant dépasser 100 m de profondeur.
- 7 Beaucoup de conduits attenants aux cenotes sont de type circulaire ou elliptique indiquant une origine à dominante phréatique. Il existe aussi des niveaux étagés. Les plafonds ont parfois des marches inversées, résultant de l'effondrement partiel de blocs issus des bancs calcaires et que l'on retrouve au plancher. Les cenotes sont reliés souvent entre eux par des galeries souterraines suffisamment larges pour permettre le passage de poissons de mer ou des méduses que l'on retrouve curieusement dans les eaux de ces derniers, parfois assez loin du littoral (Cuba, Floride, Palau, Philippines).

- 8 La description ci-dessus fait abstraction de certaines particularités locales, mais il est possible d'esquisser une typologie en fonction de leur morphologie, mais aussi de leur genèse et de leurs stades d'évolution. Leur grand nombre dans le Yucatan (jusqu'à 20/km<sup>2</sup> ; Héraud-Piña, 1995) a fait que plusieurs tentatives de classification ont été proposées dès le début du XX<sup>e</sup> siècle (Cole, 1910 ; Pearse, 1938 ; Hall, 1945). Pour notre part nous retiendrons la suivante avec :
- les cenotes cylindriques ou ellipsoïdaux, en chaudron, sont les plus spectaculaires (fig. 1). Leurs dimensions oscillent entre 10 à 60 m de diamètre à l'ouverture pour une quarantaine de mètres de profondeur jusqu'à la nappe phréatique, le fond étant encore plus loin. Les parois sont verticales ou subverticales. Une variété topographique est constituée par ceux qui sont en forme d'embout en raison de l'accumulation des matériaux sédimentaires et clastiques que les eaux n'ont pas été capables d'évacuer. Dans la région d'Orlando (Floride) de nombreux "sinkholes" se sont formés sous couverture de sables meubles (cryptokarst). L'eau de la nappe phréatique alimente ces "sinkholes" en créant des lacs circulaires et pérennes (Wilson, 1988 ; Wash, 1989).
  - les cenotes coniques profonds ont des dimensions similaires aux précédents, mais leur ouverture est beaucoup plus étroite, le plafond de la cavité ne s'étant effondré qu'en partie (fig. 2). L'ouverture donne accès à la salle. Parfois le cenote recoupe plusieurs galeries horizontales : il s'agit probablement de témoins d'anciennes circulations liées à des niveaux de base supérieurs aux actuels. Des variantes existent comme les formes en vase ou les cenotes "à fleur de terre" où la nappe est très proche de la surface.
  - les cenotes obliques ont été guidés soit par la fracturation, soit par des plissements ou des discontinuités lithologiques (fig. 3). La morphologie d'une partie d'entre eux s'explique par les talus d'effondrement qui subdivisent la cavité en deux parties (fig. 3-A). Beaucoup s'ouvrent et se prolongent par des grottes ou des cavités, et la plupart atteignent le niveau piézométrique.
- 9 En fonction de la situation de l'ouverture par rapport au niveau de la nappe, on peut distinguer deux types de cenotes :
- ceux qui présentent une séparation verticale entre la surface du sol (à l'ouverture du cenote) et celle de la nappe ;
  - ceux qui sont totalement ennoyés c'est-à-dire lorsque la nappe est pratiquement en surface ("agua-das" ; Héraud-Piña, 1995).
- 10 Dans les deux cas, la genèse doit être mise en rapport avec l'évolution de la nappe phréatique. Mais il peut aussi s'agir de formes héritées d'épisodes paléogéographiques antérieurs et qui, aujourd'hui, sont réactivés.
- 11 Sous la nappe, au fond, les dépôts empêchent la pénétration par l'homme mais pas les infiltrations si bien que l'eau peut fluer et resurgir en mer sous forme de sources sous-marines (photo 2). Ces circulations d'eau se produisent à partir des zones en charge, saturées, en direction de la mer et l'eau peut sortir sous forme d'exurgences marines (Floride, Yucatan, Cuba, Australie ; O'Driscoll, 1960 ; Floegel, 1972). Dans de très nombreux cas, les réseaux de galeries noyées relient les différents cenotes qui ne peuvent être explorés qu'en plongée. De nos jours, ils constituent l'un des derniers domaines où l'homme (le spéléonaute) peut explorer des "mondes interdits". Parfois les cenotes peuvent être coalescents. Ils résultent soit des effondrements concomitants de deux voûtes de salles souterraines voisines ("Double Well" ; Marker, 1976), soit du recoupement

des bords de deux dolines proches ("El Pozo de las Animas" dans les Andes de Malargue, Argentine ; Salomon, 1978) (photo 3).

- 12 Lorsqu'on se penche sur le problème de leur localisation, il apparaît que dans une large proportion les cenotes se situent à proximité des côtes et parfois même en mer ("trous bleus"). Cela s'explique par le rôle conjoint joué par les fluctuations du niveau de la mer et du niveau phréatique, favorisant à la fois les phénomènes de dissolution et d'effondrement (différences de pression hydrostatique).
- 13 Sur le plan lithologique, l'étude de la répartition des cenotes indique qu'ils se développent surtout dans des calcaires récents. Dans les Caraïbes, au Mexique, au Belize comme à Madagascar, les cenotes s'observent surtout dans des calcaires tertiaires ou plus récents comme les éolianites (ex : Hellshole et Pond Flat Sinkhole, Bahamas). C'est également le cas sur le littoral Mikea à Madagascar où ils trouent les rides dunaires calcarifiées (photo 4). Ceci implique une formation jeune (postérieure à la lithification), sinon ils auraient évolué et disparu. Les calcaires coralliens quaternaires abritent également de nombreux cenotes (Cuba). L'extrême sud-est de l'État de l'Australie du Sud possède de nombreux cenotes formés dans des calcaires micritiques et biomicritiques d'âge ter-tiaire. Les plus nombreux se localisent sur une plate-forme marine émergée d'une vingtaine de mètres au sud de la ville de Mount Gambier. Les dimensions varient de 8 à 82 m de diamètre, et de 8 à 61 m de profondeur. Le niveau piézométrique se situe à environ 13 m en dessous de la surface de la plaine calcaire. Du côté de la mer, les cenotes sont noyés et jouent le rôle de sources alors que vers l'intérieur, vers 30-40 m, beaucoup sont secs ou n'ont que de simples mares peu profondes. Avant l'établissement de pinèdes, de parcours irrigués et la croissance de la ville de Mount Gambier, ces cenotes étaient noyés, mais les actions anthropiques les ont asséchés.
- 14 L'ensemble de ces calcaires ont en commun une grande cohérence, une forte porosité, une faible rugosité et une bonne stabilité structurale. À l'exposition météorique, les reliefs de ces calcaires montrent de nombreuses faces affectées par des encroûtements superficiels (*case-hardening*) qui aident à leur préservation.
- 15 Il arrive également d'observer des cenotes dans des terrains gypseux et loin du littoral, à l'exemple des "Cuatro Cienagas", en plein désert de Chichuahua (Nord Mexique) où plusieurs cenotes sont reliés les uns aux autres et laissent apercevoir des eaux bleu turquoise.
- 16 Les trous bleus ne sont que des cenotes noyés par la remontée flandrienne. Longtemps considérés comme mystérieux, ils sont aujourd'hui parfaitement identifiés et expliqués (fig. 4). Les trous bleus présentent souvent des formes spécifiques en fonction de leur éloignement par rapport à la mer. En mer, il faut souligner le rôle des marées et des courants qui peuvent apporter des nutriments et des sédiments venant se piéger dans la cavité, tandis que sur le continent il existe une stratification marquée de la distribution des organismes (marins en profondeur, d'eau douce vers la surface), ce qui s'explique à la fois par les différences de salinité et d'oxygène en dilution (allant parfois à la raréfaction).
- 17 La répartition des cenotes semble indépendante de la topographie car on en observe aussi bien en terrain plat que collinaire, mais pas de la fracturation.
- 18 Les alignements de cenotes sont fréquemment observés. Ils correspondent aux grandes lignes de faiblesse (fracturation, joints) exploitées par les circulations d'eau. Souvent la localisation d'un cenote s'effectue au croisement de deux fractures. Lorsque la densité des

- cenotes est élevée (jusqu'à 88/km<sup>2</sup> dans la région de Little Blue Lake en Australie) on peut observer des alignements rectilignes (secteur de Barnoolut).
- 19 Au Yucatan, une répartition de type circulaire (fig. 5) a pu être mise en relation avec l'impact de l'astrobolème de Chicxulub (Héraud-Piña, 1995). L'anneau dessiné par la couronne de cenotes est en relation avec le gradient gravitationnel de son périmètre. Et les cenotes développés dans des calcaires tertiaires (postérieurs à l'impact) sont particulièrement grands. L'anneau représente une zone de haute perméabilité où l'eau souterraine peut couler vers la mer en donnant des sources sous-marines d'eau douce, sur les bords est et ouest du cratère (situé à plusieurs centaines de mètres en profondeur et vieux de dizaines de millions d'années). Une certaine forme de subsidence, contrôlée par la structure périphérique du cratère, a provoqué la fracturation des roches beaucoup plus récentes, laquelle a favorisé à son tour la formation des cenotes.
  - 20 Dans les régions à cenotes, la zone épikarstique est généralement très épaisse, marquée en surface par de multiples lapiès, kamenitzas, trous de dissolution et petits gouffres. La densité de ces figures karstiques est souvent très grande. Par exemple, aux Bahamas, la densité des "bananas holes" (trous de dissolution) peut dépasser 1 000/km<sup>2</sup>.
  - 21 En fait, les cenotes sont de véritables dolines d'effondrement, entièrement développées dans le calcaire, à partir de salles souterraines, sous l'effet de la présence d'une nappe phréatique relativement peu profonde, mais étendue sur le plan régional (Yucatan, Cuba, Floride, Madagascar).
  - 22 Des mélanges d'eau (*mixing corrosion*) peuvent se produire dans les zones les plus proches du littoral (James J.M., 1992). Le mélange des eaux est une des caractéristiques du milieu souterrain et, comme les eaux de mélange sont très agressives, il contribue largement à la karstification. Le phénomène est particulièrement actif dans les karsts littoraux : Forti *et al.* (1993) indiquent qu'à Palawan (Philippines) les effets de la mer se font sentir à plusieurs kilomètres de la côte. Les études hydrochimiques ont confirmé le très grand pouvoir corrosif résultant du mélange eau douce/eau salée (jusqu'à 1708 t/km<sup>2</sup>) attesté par de nombreuses cupules d'érosion et sillons le long des parois.
  - 23 De nombreux conduits aux Bahamas sont concernés par le mélange eaux douces/eaux salées (Smart *et al.*, 1988). Les fractures sont élargies par la dissolution dans la zone de mélange des eaux modelant des conduits de forme elliptique ou tubulaire. Le mélange des eaux dépend fortement de l'amplitude de la marée laquelle peut se faire sentir assez loin à l'intérieur des terres (Cuba, Yucatan, Floride) et joue sur les variations de la nappe phréatique. En Australie, ces variations sont faibles en dépit de l'aridité de la saison sèche, moyennes à Madagascar, mais fortes à Cuba. Mais dans tous les cas on observe un gradient vers la mer. Mais peut-on mettre en relation un fort gradient et la multiplication des cenotes (cas australien) ?
  - 24 À plus grande échelle, les variations eustatiques du niveau de la mer ont joué un rôle fondamental tantôt en accentuant les processus karstiques ou en les réactivant, tantôt en submergeant les cenotes (trous bleus). La présence de stalactites et stalagmites dans les trous bleus et dans les grottes noyées en est une preuve incontestable. Bien entendu, ces variations ont dû aussi affecter les gradients des surfaces.
  - 25 Dans le détail, il convient de signaler le rôle des conduits phréatiques supérieurs et surplombants qui peuvent amener l'eau dans les cenotes et les salles souterraines lors d'orages puissants.

- 26 L'ouverture du cenote est finalement l'aboutissement d'une série de processus au rang desquels on mettra en exergue la dissolution par la nappe phréatique peu profonde et les phénomènes de corrosion et dissolution remontants (illustrés par la formation de coupoles de voûte). Cette ouverture peut être extrêmement brutale, quelques minutes comme en attestent plusieurs témoignages (doline de Virelade en Gironde (Pellegrin, 1995) ou encore le célèbre accident de Winter Park, près d'Orlando (Floride) qui a englouti véhicules et constructions en 48 heures (Wilson, 1988), on peut mentionner également l'ouverture brutale d'un cenote emportant la route de Port Mac Donel, à Mount Gambier, en Afrique du Sud (Marker, 1976).
- 27 Pour Marker, les cenotes sont avant tout des phénomènes quaternaires ; mais pourquoi n'y en aurait-il pas de plus anciens ? L'Oeil Doux, d'âge tertiaire, dans la Montagne de la Clappe (Languedoc), est un véritable cenote.
- 28 À côté de ce scénario, le plus probable, il est possible de se poser la question de la possibilité de variantes comme celle d'un effondrement sous couverture, du rôle de la suffosion ou de la corrosion remontante (Sweeting, 1972).
- 29 La plupart semblent s'être formés dans la zone vadose lors de bas niveaux marins, hypothèse déjà pressentie par Agassiz dès 1894. Le scénario de la formation d'un cenote serait le suivant (fig. 6).
- 30 Il semble que la plate-forme du Yucatan était émergée il y a 195 millions d'années (ma). Puis, au Jurassique (de 195 à 140 ma), elle a été partiellement submergée et recouverte de dépôts de sédiments carbonatés.
- 31 Au Quaternaire (de 2 ma à -12 000 - 8 000 ans), elle a connu une évolution intéressante. Vers 145 000 - 125 000 ans elle était légèrement exondée (datations sur beach-rocks) autorisant ainsi une karstification notable. De même lors du dernier interglaciaire, le niveau marin a été légèrement supérieur au niveau actuel (jusqu'à 6-7 m?) permettant aux plates-formes coralliennes de se développer.
- 32 Par contre au maximum glaciaire (vers - 18 000 ans), le niveau de la mer est descendu à environ - 110 m : à ce moment là la karstification conduisant à la formation des cenotes a pu opérer. Au départ se produisent des infiltrations généralisées au travers des diaclases, qui alimentent un niveau phréatique. Puis interviennent une corrosion et un creusement phréatique sans doute à partir du plafond d'une petite cavité car au niveau du plancher l'eau a tendance à être saturée. Finalement une petite voûte apparaît.
- 33 Les effondrements auraient été favorisés par la baisse du niveau marin entraînant un abaissement du niveau de base général, une descente des niveaux phréatiques et d'importantes modifications de la pression hydrostatique au sein de la masse rocheuse.
- 34 La dissolution aurait été accélérée par le piégeage, puis la décomposition de la matière organique, un peu comme dans une gigantesque kamenitza. Les calcaires ont d'ailleurs laissé d'importants dépôts d'argiles de décalcification lesquels constituent une grande partie des sédiments de la baie de Chetumal (Belize). Dans le secteur de Tulum, en mer, la présence de nombreux canyons situés dans le prolongement des grands réseaux souterrains actuels confirme cette hypothèse d'autant que leur morphologie labyrinthique évoque un creusement par dissolution karstique.
- 35 Quelques datations ont été réalisées sur des concrétions (Héraud-Piña, 1996) au sud de Merida. Les résultats donnent des âges récents : 44 000 ans pour la concrétion prélevée sous l'eau et 140 000 ans pour celle prélevée au-dessus de l'eau. Tout ceci est en accord

avec l'hypothèse évoquée puisque dans le karst les galeries les plus anciennes sont les plus élevées.

- 36 Par la suite, le cenote s'agrandit de tous côtés, à la fois par abaissement du niveau phréatique, par démolition progressive des strates avec la corrosion et les porte-à-faux et par l'action dissolvantes des eaux d'infiltration venues de la surface, encore agressives, et élargissant les conduits. Ensuite, le vide créé dans la masse rocheuse provoque et accentue l'enfoncement du plancher en surface.
- 37 Il peut même se produire de nouvelles ouvertures et une accumulation de débris formant un cône au fond du cenote. Avec le temps, ce dernier grandit et peut émerger en formant une sorte d'île. Ces effondrements sont autant de regards donnant accès aux réseaux noyés souterrains comme à Lucayan Caverns (Grand Bahama) avec plus de 14 km de réseau (Williams, 1980).
- 38 Dans le détail, l'évolution peut prendre plusieurs voies. Il peut y avoir :
- un assèchement en cas de baisse brutale du niveau phréatique ou approfondissement progressif si la descente est lente ; la formation de spéléothèmes est alors possible ;
  - un colmatage total par effondrement des parois et élargissement de l'ouverture accompagné d'un piégeage de sédiments extérieurs. La profondeur de l'eau du cenote diminue peu à peu et, à la limite, le cenote peut totalement disparaître de la topographie ;
  - une réactivation en cas de remontée de la nappe et évacuation (lente) des sédiments (par voie chimique essentiellement) ; bien des trous bleus ont conservé des stalactites.
- 39 Une fois ouvert, avec le temps, le diamètre du cenote s'agrandit alors que sa profondeur diminue à mesure qu'il se colmate, tout comme le trou bleu. Aujourd'hui, l'évolution semble ralentie encore que les eaux d'infiltration au cours de la saison des pluies et le jeu des marées qui se fait sentir souvent loin vers l'intérieur de la plate-forme carbonatée, continuent à faire le jeu de la dissolution. La plongée dans un cenote permet de s'en rendre compte où l'on observe une stratification des eaux qui fluctue dans le temps et sur le plan vertical (de l'ordre de 15 à 30 cm). L'eau douce, plus légère se situe toujours au-dessus, puis vient une zone d'eau trouble ou halocline, bien visible au masque et facilement photographiable, qui correspond à un mélange au contact de l'eau douce/eau salée, puis immédiatement en dessous l'eau salée de profondeur (fig. 7).
- 40 Les mesures en profondeur ont permis de tracer la limite inférieure de l'eau douce dans la péninsule du Yucatan : elle obéit à la représentation schématique de la lentille d'eau de "Ghyben Herzberg", bien connu dans les îles tropicales (fig. 8).
- 41 Depuis plusieurs décennies, les côtes tropicales où l'on pratique la plongée occupent une place importante dans le marché touristique mondial (Caraïbes, Golden Coast australienne, îles du Pacifique, océan Indien, etc.). Cette attraction pour les côtes tropicales s'est traduite par des croissances touristiques extraordinaires. La croissance annuelle a été de + 30 % pour Cancun de 1975 à 1990 (Brousse, 2000), et des chiffres à peine inférieurs sont relevés pour Solidaridad et Cozumel (Yucatan), Varadero (Cuba) ou la Golden Coast (Australie).
- 42 Si les plages ensoleillées et le parcours des récifs coralliens sont toujours les premiers motifs d'attraction, depuis une décennie, trous bleus et cenotes offrent des alternatives séduisantes notamment ces derniers plus faciles d'accès. Selon la tradition maya-toltèque, le cenote est un lieu hautement sacré. Non seulement il est le seul moyen permettant de puiser dans la nappe phréatique dans un pays où nul cours d'eau n'existe en surface, mais il est également la porte d'accès au monde d'en bas, à l'inframonde. À Chichen-Itza, de

jeunes vierges et des enfants étaient drogués, sacrifiés et jetés dans le Cenote Dzonot (Puits Sacré) afin d'honorer le Dieu de la Pluie Tlaloc (fig. 5). Le grand site maya-toltèque de Chichen-Itza s'est édifié en fonction de ce cenote de 65 m de circonférence et profond d'une trentaine de mètres. Les autres grands sites archéologiques ne sont jamais éloignés de cenotes à l'image de Coba ou de Tulum. Beaucoup de cenotes portent encore les traces d'aménagements effectués par les Mayas pour accéder à l'eau comme celui de Dznit Nup où les escaliers ont été creusés à même le roc.

- 43 Au Yucatan, ces sites archéologiques ont été à l'origine d'un tourisme culturel qui ne s'est jamais démenti, mais il a été relayé dans les années 1980 par un tourisme balnéaire de masse. Entre Punta Brava et Punta Allen est née la Riviera Maya avec son cortège d'hôtels et d'activités classiques liées à la mer et au soleil (Playa del Carmen, Cancun, Puerto Morelos, etc.). La Riviera Maya est aujourd'hui irriguée par l'autoroute 307 et des aéroports modernes : 25 000 chambres d'hôtel ont été ouvertes ces 7 dernières années ! Toutefois une place à part doit être réservée au tourisme de plongée, d'abord initié par la présence de splendides récifs coralliens dans la mer Caraïbe, puis par celui des calanques littorales (*caletas*) enfin celui, plus élitiste, dans les cenotes.
- 44 Les premières explorations, suivies de relevés et de cartographies, eurent lieu dans les années 1980. Aujourd'hui plusieurs centaines de cenotes ont été reconnus et beaucoup restent encore à inventorier car certains se situent sous la canopée dense de la forêt tropicale et les chemins d'accès sont très rares.
- 45 Posséder aujourd'hui un cenote est une aubaine. Avec quelques faibles aménagements tels que la constitution d'un sentier d'accès bien balisé par des coquillages et un escalier permettant de descendre dans l'eau, les propriétaires lèvent des péages (généralement 5 \$ par personne) autrement plus lucratifs que le faible rapport d'un champ de maïs. Il est vrai que les entrées sont généralement magnifiques, garnies de spéléothèmes, de voiles et de pendeloques. Certains présentent de véritables colonnes de cathédrale. Tous sont différents, les uns à dominante blanche, d'autres de couleur ocre, mais tous ont en commun une eau tiède et cristalline. De nombreux clubs américains, ou sociétés de plongée commerciales, se sont abouchés avec les propriétaires (particuliers, *ejidos* ou syndicats) : ils y amènent des groupes de baigneurs et de plongeurs encadrés par quelques guides expérimentés et disposant du matériel de plongée. Étant donné que certains cenotes donnent accès à des dizaines de kilomètres de galeries, il a fallu équiper certains circuits de fils d'Ariane. Et l'on prend l'habitude de distinguer les circuits de plongée avec lumière du jour, toujours visible (l'immense majorité), des "circuits d'exploration" où le fil d'Ariane est impératif. En 2003, plus d'une cinquantaine de réseaux pour un total cumulé de plus de 400 km de galeries noyées ont été reconnus, ce qui en fait un incontestable record mondial. Et chaque année de nouveaux cenotes sont explorés et de nouveaux parcours s'ajoutent aux précédents. La liste des dix plus importants, reconnus à ce jour, est la suivante :
- 46 En mer, un bon exemple d'exploitation par le tourisme est celui du Trou Bleu d'Ambergris Caye, la plus grande île corallienne du Belize. Ambergris Caye (4 km de largeur) a été isolé du continent par la remontée de la mer il y a 6 500 ans. Ce trou bleu est célèbre du fait de sa circonférence parfaite (diamètre : 350 m) et de sa profondeur (145 m). Il est régulièrement photographié d'avion et visité par les touristes et est devenu un grand centre pour plongeurs amateurs. L'une de ses curiosités sont les grottes débouchant sur ses parois et qui conservent encore des stalactites au plafond. Les multiples trous bleus

des Bahamas sont également l'une des destinations privilégiées d'amateurs de plongée de bon niveau.

- 47 Le développement touristique n'est pas sans effets sur les écosystèmes qui constituent sa raison d'être. La pression touristique induit des modifications environnementales, et l'impact est d'autant plus grand que la fréquentation des intervenants est plus dense et que le milieu est plus fragile, ce qui est le cas des cenotes.
- 48 La lumière apparaît comme le paramètre essentiel pour la flore et la faune des cenotes. Ainsi dans les cenotes ouverts et semi ouverts, on rencontre du phytoplancton qui est à l'origine des réseaux trophiques. Le cortège faunistique est riche et spécifique, et les chaînes alimentaires développées.
- 49 Mais avec l'obscurité la végétation disparaît c'est pourquoi la plupart des animaux se restreignent à la zone d'entrée. Certains se tiennent cependant en zone obscure avec des signes d'adaptation - dépigmentation, perte de la vue - au profit du développement de capteurs sensoriels. Dans les cenotes fermés, les organismes se nourrissent de matières organiques issues de la surface ou provenant de cavernicoles (guano de chauve-souris). Toutes ces adaptations ont abouti au développement d'espèces endémiques uniques d'autant plus variées que certaines sont plutôt inféodées aux eaux douces et les autres aux eaux saumâtres, certaines sont d'origine continentale et d'autres marine. Les cenotes ont donc une très grande valeur en matière de biodiversité. Ce patrimoine naturel mérite considération aussi certaines réserves écologiques ont-elles été créées comme celle de Cuxtal (sud de Merida, Yucatan) qui permet d'observer ces organismes. Il est évident que ces écosystèmes vulnérables nécessitent une gestion spécifique.
- 50 Même si la consommation d'eau ne cesse d'augmenter, aujourd'hui le problème de la quantité d'eau disponible ne semble pas très préoccupant : le Yucatan est relativement bien arrosé et reçoit jusqu'à 1 500 mm dans certains secteurs ce qui permet une rapide infiltration dans le réservoir karstique. Par contre celui de la qualité de cette eau inquiète. Le problème est double : il existe des contaminations directes et un risque de salinisation.
- 51 Le problème est que nul ne s'est posé la question de la surfréquentation de ces lieux exceptionnels, où l'on peut voir à la fois hirondelles et poissons. Elle ne manquera pas de générer une pollution qu'il sera alors difficile de contrôler. Combien de touristes et combien d'années encore le milieu supportera-t-il les atteintes qui se développent à son encontre ?
- 52 Les huiles solaires des baigneurs, les savons et les détergents amenés par les femmes qui viennent faire la lessive ne sont pas sans conséquences. Un bel exemple est celui du Cenote Aktun Ha près de Tulum et surnommé "Carwash" ce qui se passe de commentaires. Les méfaits de l'agriculture productiviste (engrais chimiques, pesticides, insecticides, etc.) se font déjà sentir dans de nombreux cenotes.
- 53 Avec les plongées, de multiples dégradations peuvent s'observer dans les cenotes : vandalisme, graffiti, bris volontaires de stalactites et stalagmites, etc. Or, par définition, ces concrétions ne peuvent absolument pas se régénérer sous l'eau. De même les bulles dégagées des appareils de plongée provoquent des dégâts insoupçonnés : elles arrivent au plafond des galeries ou des salles avec une telle force qu'elles peuvent provoquer des bris de petites concrétions (fistuleuses) lesquelles viennent s'accumuler sur le plancher.
- 54 L'aquifère karstique est très vulnérable aux déchets. Pourtant résidus domestiques, effluents hydrocarbures, effluents, etc., sont jetés sans vergogne dans les cenotes

considérés comme des décharges (y compris par certaines municipalités !). De nombreuses fosses septiques sont situées à l'aplomb des rivières souterraines ou de l'aquifère de telle sorte que la contamination bactériologique consécutive pose de sérieux problèmes d'ordre sanitaire (typhoïde, choléra, hépatites, dysenteries, maladies de la peau...). Les germes transitent dans l'aquifère endokarstique répandant leur nuisance. Sur la côte Caraïbe, ce sont des réseaux entiers d'écoulements clandestins qui se déversent dans ces cavités. Or le karst n'a pratiquement pas de pouvoir épurateur et les risques de contamination bactérienne sont très grands.

- 55 Aujourd'hui, beaucoup de cenotes présentent des phénomènes d'eutrophisation (prolifération d'algues) lesquels conduisent, à court terme, à la disparition de toute vie dans les eaux de ces derniers.
- 56 Par ailleurs, il existe un autre danger venant de pompages inadaptés conduisant à une contamination de l'aquifère par les eaux marines, notamment à proximité du littoral comme ce fut le cas sur la côte méridionale de Cuba (Salomon, 1998). Autrefois les paysans se contentaient de puits ou de norias lesquels ne prélevaient que de faibles débits. Avec l'avènement du tourisme de masse, les besoins ont été multipliés. Les pompages se sont répandus et sont devenus très performants. Entre 1987 et 1997 les prélèvements destinés à alimenter Cancun sont passés de 60 000 m<sup>3</sup>/jour à 130 000 m<sup>3</sup>/jour. Ces pompages, particulièrement prononcés en saison sèche, favorisent la remontée de l'interface saline vers l'intérieur des terres et l'intrusion d'eau salée (jusqu'à 15 km dans la région de Bolondron, à Cuba) au point que certains cenotes fournissent une eau impropre à l'irrigation avec les conséquences que l'on devine sur les cultures (fig. 9). Dans bien des régions littorales, les captages ont entraîné une modification des courants locaux souterrains sans que l'on puisse bien en mesurer les conséquences. Dans certains cas, les eaux prélevées doivent désormais subir un traitement de dessalement (*ablandamiento*).
- 57 Enfin, une grande partie de ces eaux polluées ressort en mer, parfois au sein même des trous bleus (cas de Dzilam Bravo, avec un débit estimé à 5 m<sup>3</sup>/s !) en contaminant gravement les eaux de baignade et le milieu marin ce qui contribue à la mort des organismes récifaux. C'est tout l'écosystème récifal qui est pourrait être menacé de nécrose car Thomas (1999) estime à 1,56 milliard de m<sup>3</sup> les eaux douces qui ressortent en mer au large du Yucatan. Ce même auteur a mis en évidence le temps de renouvellement extrêmement long en eau douce (plusieurs années) ce qui n'est pas sans influence sur l'exploitation de l'eau. Et l'utilisation de pompages intensifs a pour effet de faire remonter l'eau salée, notamment au moment de la saison sèche. L'alimentation des grandes villes du littoral (Cancun, Playa del Carmen) pose donc problème. La solution adoptée, le captage chaque fois plus lointain, n'est qu'un pis-aller car cela risque d'engendrer une remontée de l'halocline et une nouvelle avancée du front de salinisation.
- 58 Il apparaît qu'une politique de préservation et de protection doit impérativement s'accompagner d'un équipement en stations de traitement des déchets, d'épuration et de traitement des eaux.
- 59 L'intérêt des cenotes n'étant plus à démontrer, une gestion rationnelle doit se mettre en place au plus vite des intérêts mêmes des populations. Cela passe d'abord par un recensement des cenotes et trous bleus dont l'intérêt est multiple : il s'agit dans un premier temps de promouvoir une gestion rationnelle de la ressource en eau pour les besoins domestiques, du tourisme et de l'agriculture, voire de l'industrie (les usines textiles et du traitement du sisal sont de grandes consommatrices d'eau). Localement cela

passer par la réalisation de travaux de voirie, d'entretien des cenotes et par la mise en place d'équipements de pompage, de traitements adaptés et surtout d'une réglementation. Celle-ci commence à voir le jour surtout avec des recommandations de sécurité pour la plongée en galeries noyées. Mais elle n'est respectée que là où il existe une véritable surveillance de la part des propriétaires.

- 60 Dans ce contexte, les conflits d'acteurs et d'intérêts ne manqueront pas d'éclater. La volonté de préserver la qualité des cenotes vient essentiellement de la pression du secteur touristique lequel a bien compris aujourd'hui quel trésor il avait à disposition. Le but affiché est de promouvoir le développement de pratiques complémentaires aux plongées sous-marines qui attirent sur tout le littoral des foules de touristes au point que des signes de saturation sont apparus. Par contre un territoire comme le Campeche apparaît moins concerné par cet aspect : seule l'exploitation de la ressource, pour son agriculture notamment, le préoccupe, alors qu'il possède le plus grand nombre de cenotes. Cet État et les *ejidos* ont mis en place des programmes (ex : programme des "Camino Blancos") visant depuis 1992 à établir des voies d'accès vers les cenotes afin de faciliter l'installation de systèmes d'irrigation. Ce faisant de nombreux vestiges archéologiques sont ainsi mis à jour ce qui représente un autre intérêt.
- 61 Les hommes ont bien compris que les cenotes et les trous bleus constituaient des biens très précieux et pas seulement en tant que phénomènes karstologiques. Ils contribuent pour beaucoup à la mise en valeur de régions touristiques et sont des accès à une matière de plus en plus précieuse : l'eau.
- 62 Destiner cette eau à la seule pratique touristique consisterait à remettre en cause la survie de sociétés pour l'essentiel paysannes. Inversement ces dernières ne peuvent pas rester figées sur elles-mêmes et doivent participer à la manne distribuée par le tourisme, ce qui est loin d'être le cas. Cependant force est d'admettre aujourd'hui que cette richesse est en péril, menacée par la pollution. La seule issue réside dans la mise en place d'une gestion rationnelle et durable prenant en compte des critères de qualité. Entre mise en valeur et préservation un compromis doit se dessiner qui passerait par la mise en place d'une réglementation issue d'un consensus. Il faudrait également des infrastructures adaptées (réseau routier, stations d'épuration et de traitement des eaux, des systèmes de pompage contrôlés, parcs et réserves naturelles, etc.). Il conviendrait également de veiller à la sensibilisation des populations par une éducation et une information adéquates (les rencontres internationales qui réunissent régulièrement au Yucatan chercheurs et spéléologues du monde entier, vont dans ce sens). L'État mexicain en est conscient et commence à mettre en place des programmes pour le "tourisme durable".
- 63 Le développement économique n'est pas antagoniste des préoccupations légitimes de conservation des attraits naturels des trous bleus et des cenotes, et vice-versa.

---

## BIBLIOGRAPHIE

AGASSIZ A., 1894 - A reconnaissance of the Bahamas and of the elevated reefs of Cuba. Bull. of the Museum of Comparative Zoology, vol. 26, p. 1-203

- BACK W., 1992 - Coastal karst formed by ground-water discharge. In : Hydrogeology of selected karst region, vol. 13, p. 461-466. (Yucatan)
- BACKSHALL D.G., BARNETT J. et DAVIES P. J., 1979 - Drowned dolines - the blue holes of the Pompey Reefs, Great Barrier Reef. BMR journal of Australian geology and geophysics, 4, p. 99-109
- BATTISTINI R., 1964 - L'Extrême Sud de Madagascar. Etude géomorphologique. Paris, Cujas, 636 p.
- BROOKG.A. et FORD D.C., 1974 - Nahanni karst: unique northern landscape. Canadian Geographical Journal, June, p. 36-72
- BROUSSE C., 2000 - Tourisme et impact environnemental sur le littoral mexicain des Caraïbes. Institut de Géographie, Université Michel de Montaigne- Bordeaux-3, 168 p., (Mém. Maîtrise)
- DILL R.F., 1977 - The blue holes - geologically significant sink holes and caves off British Honduras and Andros, Bahama Islands. In : Proceedings of the 3rd International Coral Reef Symposium, Miami 2, p. 238-242.
- FAIRBRIDGE R.W., 1968 - Encyclopedia of Geomorphology. Rheinhold Book Corp., New York.
- FLOEGGEL H., 1972 - The position of the lower Tertiary artesian aquifer within the hydrology and geochemistry of the Gambier embayment area (S.A/Vic.), Tech. Univ., Munich. (Ph.D. thesis)
- FORTI P. et al., 1993 - Note preliminari sull'idrodinamica del sistema carsico di St Paul (Palawan, Filippine). Bull. Soc. Géogr. de Liège, 29, p. 37-44.
- GERRARD S. - 1996 - Quintana Roo's cenotes, caves hand carved by god. Deep Tech, p. 24-31.
- HERAUD-PIÑA M-A., 1995 - Le karst du Yucatan. Coll. "Scieterren", Presses Universitaires de Bordeaux, Pessac, 282 p.
- JAMES J.M., 1992 - Corrosion par mélange des eaux dans les grottes de Nullarbor, Australie. In : Karst et évolutions climatiques. Presses Univ. de Bordeaux, p. 332-348.
- JENNINGS J.N., 1971 - Karst. M.I.T. Press, London.
- KNAB O., 1986 - Plongées touristiques (expédition Australie, Pacifique Sud, Mexique, Floride). Info-plongée, F. F. S., Paris, n°47, p. 5-18.
- LAZCANO J., 1985 - The deep cenotes. AMCS, Mexico, n° 17, p.70-76.
- LAZCANO C., SANCHEZ PINTO I., 1986 - Estudio preliminar de los cenotes y cavidades del area de Homum-Cuzama Estado de Yucatan Mexico. In : Com. Intern. de Spéléo., Barcelone, I, p.104-106.
- LLORET J., 1989 - Viatge espeleologic al Yucatan (mexic) i Belize. Circ. C.E. Aliga (Barcelone), 301, p. 7-8.
- MARKER M.E., 1976 - Cenotes : A class of enclosed karst hollows. Zeit. Geomorph. N.F., Suppl. Bd., p. 104-123.
- MAZZULLO S., 1999 - Geologic history of Ambergris Caye. Dpt. of Geology, Whichita State University.
- O'DRISCOLL E.P.D., 1960 - The hydrology of the Murray Basin Province of South Australia. Geol. Surv. S.A. Bull., 35.
- OLLIER C.D., 1975 - Coral Island geomorphology: the Trobriand Islands. Zeit Geomorph., 19 (2), p. 164-190.
- PALMER R.J., HUTCHINSON J.M.C., SCHWABE S.J. et WHITAKER F.F., 1998 - Inventory of blue holes sites explored or visited on Andros Island, Bahamas. Cave and Karst Science. Vol. 25 (2), p. 97-102.

- PELEGRIN J.C., 1995 - Les dolines de Virelade (Gironde). Bull Trav. du L.G.P.A., Pessac, n° 13, p. 63-67.
- POHL E.R., 1955 - Vertical shafts in limestone caves. Nat. Spel. Soc., Occ. Paper 2, p. 24
- REDDELL, 1977 - A preliminary survey of the caves of the Yucatan peninsula. Association for Mexican Cave Studies Bulletin, vol. 6, p. 219-296.
- SALOMON J.N., 1978 - Un karst dans le gypse : la vallée du Rio Salado (Argentine). Rev. Geog. Alpine, n° 2, p. 349-353.
- SALOMON J.N., 1986 - Le Sud-Ouest de Madagascar. Etude de Géographie Physique. Presses Universitaires de Bordeaux, 998 p.
- SALOMON J.N., 1998 - Relation entre karsts, aquifères et niveaux de la mer à Cuba. Hommes et Terres du Nord, Lille, n° 1/2, p. 82-96, 11 fig., 2 photos.
- SEXTON R.T., 1965 - Caves of the areas of South Australia. Helictite 3, 3, p. 45-69.
- SMART P.L., DAWANS J.M. et WHITAKER F.F., 1988 - Carbonate dissolution in a moderne mixing zone, South Andros, Bahamas. Nature, Vol. 335, p. 811-813.
- STRINGFIELD V.T. et LEGRAND H.E., 1966 - Hydrology of limestone in the coastal plain of the southeastern terranes States. US Geol. Surv., Special Paper, 93.
- STRINGFIELD V.T. et LEGRAND H.E., 1974 - cité par LAZCANO et al. 1986.
- SWEETING M.M., 1972 - Karst Landforms, Mac Millan, London.
- THOMAS C., 1987 - Grottes de Nouvelle-Calédonie, Nouméa, 52 p.
- THOMAS C., 1999 - Aspects hydrogéologiques du Yucatan (Mexique). Karstologia, n° 34, p. 9-22.
- THORNBURY W.D., 1954 - Principles of Geomorphology. Wiley & Sons, New York.
- WASH, 1989 - Some aspects of Florida's covered karst. Intern. Ass. of Hydrolog., Floride, p. 1-6.
- WHITAKER F.F., 1998 - The Blue Hole of the Bahamas : an overview and introduction to Andros project. Cave and Karst Science, Vol. 25, p. 53-56.
- WILLIAMS D.W., 1980 - Lucayan Caverns. National Speleological Society Bull., Vol. 47, p. 1-77.
- WILLIAMS P.W., 1969 - The geomorphic effects of groundwater . In : Chorley R., ed. - Water Earth and Man. Methuen, London, p. 269-284.
- WILSON W., 1988 - Karst of the Orlando area. Univ. of Central Florida, 75 p.
- WILSON W.L., 1994 - Morphology and hydrology of the deepest known cave in the Bahamas : Dean Blue Hole, Long Island. In : Boardman. M.R., ed. - Proceeding of the 7th Symposium of the Geology of the Bahamas. Bahamian Field Station, San Salvador.

## RÉSUMÉS

Les cenotes sont des avens d'origine karstique qui donnent regard sur la nappe phréatique. Les trous bleus sont de même origine mais se situent en mer. Ces formes originales ont longtemps été considérées comme mystérieuses : pourtant elles sont connues depuis très longtemps. C'est grâce aux cenotes que la civilisation maya a pu se développer car ils permettaient l'accès à l'eau. Plus tard, de la colonisation et jusqu'à l'époque actuelle, des pompages dans les cenotes ont permis l'établissement de villages et villes et le développement de cultures. De nos jours l'essor rapide du

tourisme (Riviera Maya), souvent peu contrôlé, apparaît comme une menace à la fois directe pour ces curiosités de la nature en raison des trop nombreuses visites en plongée, et indirecte au travers de la qualité de la ressource en eau. L'auteur entend, après avoir décrit une typologie de cenotes et expliqué leur genèse, présenter l'ensemble des problèmes qui gravitent autour de ces sites remarquables.

Cenotes are swallowholes from karstic origins that emerge onto the groundwater. Blue holes have the same origins but are situated at sea. These original forms have been considered mysterious for a long time. It is thanks to the cenotes that the Maya civilization was able to develop, for they gave the people access to water. Later, from the time of colonisation until the present day, due to the pumping nature of the cenotes, villages and cities have been able to establish and cultures have developed. Nowadays, the rapid growth of tourism (the Maya Riviera), often little controlled, looms as a menace, both directly for these curiosities of nature due to too many diving expeditions, and indirectly through effecting the quality of the water ressource. The author intends, after having written a typological of these cenotes and explained their genesis, to able all the problems that revolve around these remarkable sites.

## INDEX

**Mots-clés** : Australie, Caraïbes, cenotes, environnement, hydrologie, karst, Mexique, tourisme

**Keywords** : Australia, Carribean Islands, Carribean Sea, environment, hydrology, Madagascar, Mexico, tourism

## AUTEUR

**JEAN-NOËL SALOMON**

L.G.P.A. et INTERMET, Institut de géographie, Université Michel De Montaigne Bordeaux 3, 33607 Pessac