



FESTIVAL
EN LIGNE

16^E ÉDITION | FESTIVAL INTERNATIONAL DU FILM SCIENTIFIQUE

PARISCIENCE

En partenariat
avec l'Institut
de physique
du globe de Paris

-- Fiche d'accompagnement --

L'HISTOIRE SECRÈTE DES PAYSAGES -
LES CÉNOTES DU MEXIQUE

© ARTE France - Bonne Pioche Télévision

PROGRAMMATION SCOLAIRE : DU 30 SEPTEMBRE AU 16 OCTOBRE 2020



Sommaire

L'Histoire secrète des paysages - Les Cénotes du Mexique	1
Sélection de ressources.....	2
Proposition d'activité préparatoire.....	4
Extraits du film.....	5
Notions et infos clés	6
Citations issues du film, pistes de réflexion	11

L'Histoire secrète des paysages - Les Cénotes du Mexique

Réalisé par **Hervé Glabeck** et **Anaïs van Ditzhuyzen**
Écrit par **Hervé Glabeck**, **Anaïs van Ditzhuyzen** et **Claire Lecœuvre**

51 min - France - 2020

© ARTE France - Bonne Pioche Télévision

Avec la participation d'Ushuaïa TV

Diffusion française : ARTE, Ushuaïa TV



© ARTE France, Bonne Pioche Télévision, Paramounti

Les cénotes, anciennes grottes souterraines remplies d'eau rendues visibles depuis la surface par l'érosion, sont une curiosité géologique et des protagonistes importants de la culture Maya. Ils sont connectés par un labyrinthe de galeries inondées : un dédale, source d'eau essentielle à l'équilibre de la péninsule du Yucatan, contribuant au développement de la vie dans la région. Des scientifiques, géophysicien, archéologue, géochimiste et biologiste, tentent de percer les secrets de ce paysage : sa formation, son évolution, son occupation. Ils étudient aussi l'impact des actions humaines sur le territoire afin d'y permettre une occupation durable.



© ARTE France, Bonne Pioche Télévision, Paramounti



© ARTE France, Bonne Pioche Télévision, Paramounti

Sélection de ressources

ARTE

La série « L'Histoire secrète des paysages » est disponible en replay sur ARTE jusqu'au 01/11/2020.

<https://www.arte.tv/fr/videos/086096-001-A/l-histoire-secrete-des-paysages/>

<https://www.arte.tv/fr/videos/086096-002-A/l-histoire-secrete-des-paysages/>

SCIENCES ET AVENIR

La plus grande grotte submergée du monde se trouve au Mexique / 2018

https://www.sciencesetavenir.fr/nature-environnement/la-plus-grande-grotte-submergee-du-monde-mesure-347-kilometres-et-a-ete-decouverte-au-mexique_119939

La pyramide Maya d'El Castillo et ses 2 structures secrètes : 2016

https://www.sciencesetavenir.fr/archeo-paleo/archeologie/la-pyramide-maya-d-el-castillo-et-ses-2-structures-secretes_108298

GEO

- **Mexique: une grotte sous-marine virtuelle pour plonger dans le réel**, article de l'AFP, février 2018

<https://www.geo.fr/environnement/mexique-une-grotte-sous-marine-virtuelle-pour-plonger-dans-le-reel-185272>

- **Mexique : des vestiges mayas dans une immense grotte inondée**

<https://www.geo.fr/environnement/mexique-des-vestiges-mayas-dans-une-immense-grotte-inondee-185204>

LE MONDE

- **Cénotes, plongée au cœur du peuple Maya**, article d'Olivier Dumons, 2017

https://www.lemonde.fr/grands-formats/visuel/2017/04/22/dans-les-profondeurs-des-mondes-mayas_5115613_4497053.html

- **Dans les profondeurs des mondes mayas**, article d'Olivier Dumons, 2017

https://www.lemonde.fr/m-voyage/article/2017/04/06/dans-l-antre-monde-maya_5106629_4497613.html

CANAL-U



En source documentaire complémentaire pour les enseignants (accessibles pour des lycéens confirmés), vous trouverez ci-dessous plusieurs liens vers une sélection de ressources abordant des thématiques liées au Mexique :

- **Sur une autre région du Mexique / "Des richesses écologiques aux spécificités de l'hydrosystème justifiant la mise en Réserve"**

https://www.canal-u.tv/video/canal_uved/des_richesses_ecologiques_aux_specificites_de_l_hydrosysteme_justifiant_la_mise_en_reserve.45837

EDUC'ARTE



Educ'Arte est une plateforme pédagogique en ligne regroupant une variété de ressources (films, séries, courts métrages...) et d'outils au service des enseignants et de leurs élèves. À la suite du festival, chaque enseignant.e se verra attribuer un code qui lui permettra de découvrir son contenu gratuitement et ce pendant un mois et demi. Vous trouverez ci-après plusieurs liens vers une sélection de ressources liées à la programmation 2020 de Pariscience :

- **La valse des continents - L'Amérique Centrale**, un film de Alexis de Favitski, 2013, 42 minutes
<https://educ.arte.tv/program/la-valse-des-continents-l-amerique-centrale>

- **Printemps sous surveillance : Quand les scientifiques décryptent la nature**, un film de François-Xavier Vives, 2011, 50 minutes
<https://educ.arte.tv/program/printemps-sous-surveillance-quand-les-scientifiques-decryptent-la-nature>

- **Le Dessous des cartes - Mexique, un émergent entravé**, présenté par Jean-Christophe Victor, 2013, 12 minutes
<https://educ.arte.tv/program/le-dessous-des-cartes-mexique-un-emergent-entrave>

- **Jungle d'eau douce, un film de Serge Dumont**, Frank Nischk, Sarah Zierul et Thomas Weidenbach, 2011, 43 minutes
<https://educ.arte.tv/program/jungle-d-eau-douce>

Proposition d'activité préparatoire

Ressources : des extraits sonores et des captures d'images issues des films sont disponibles en téléchargement via ce lien : *Lien disponible pour enseignant.e participant*

Objectif : introduire le film que les élèves vont découvrir en développant leurs capacités d'imagination, d'observation et d'analyse.

Proposer aux élèves, par étape, d'émettre des hypothèses sur le contenu des documentaires qu'ils vont être amenés à voir. Pour chaque film :

1. Commencer par faire écouter des extraits sonores du film.
2. Présenter aux élèves les captures d'images.
3. Enfin, soumettre le titre du documentaire aux élèves.

Captures d'images (elles sont disponibles, en grand format, via le lien de téléchargement au-dessus).



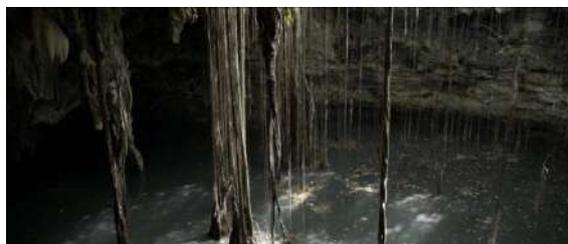
1



2



3



4



5



6

© ARTE France - Bonne Pioche Télévision

Légende des images :

1. Observation des parois d'un cénote et des fossiles incrustés à l'intérieur. Analyse du paysage et de sa formation par le géophysicien Mario Rebolledo Vieyra.
2. Les cénotes sont utilisés comme des réserves d'eau douce et permettent à des agriculteurs d'installer des petites exploitations.

3. Animation illustrant la formation de la péninsule du Yucatan et sa sortie de l'eau, ainsi que le principe d'érosion qui a créé des galeries dans la roche calcaire.
4. Intérieur d'un cénote et racines de la végétation descendant y chercher de l'eau.
5. Préparation d'une plongée dans le dédale des cénotes et galeries sous-terraines.
6. Rite Maya en l'honneur des cénotes.

Extraits du film

Les extraits peuvent être utiles pour les enseignant.e.s en amont du visionnage. Nous conseillons cependant de ne pas montrer les extraits du film aux élèves en introduction du documentaire (nous vous conseillons d'utiliser les captures d'image et les extraits sonores). Nous conseillons en effet de les exploiter plutôt après visionnage, pour remémorer le film aux élèves si nécessaire, à la suite de la projection, avant la participation au RDV en ligne, par exemple.

Les extraits sont visionnables ici : *Lien disponible pour enseignant.e participant*

Notions et infos clés

Vocabulaire / concepts clés :

- Cénote
- Halocline
- Géophysique / géochimie
- Erosion
- Aquifère
- Géologie
- Résurgence

Intervenant.e.s :

- **Leydi Lubely Dorsantes**, chamane (maya yucatèque, perpétue la médecine traditionnelle, guérisseuse et prêtresse)
- **Mario Rebolledo Vieyra**, géophysicien
- **Lemuel Kuezarate**, paysan
- **Tristan Menant Leclercq**, guide touristique fondateur de Sayab Trip
- **Raoul Padilla Borja**, guide touristique, spécialiste des jaguars
- **Jeronimo Aviles**, spéléologue et archéologue sous-marin
- **Maria José Gómez Cobá**, archéologue, présidente du groupe de spéléologie Ajau
- **Mariana Gómez-Nicolas**, physicienne au Laboratoire National de résilience côtière du Mexique
- **Flor Arcega**, géochimiste à l'université autonome nationale du Mexique
- **Efraín Chávez Solís**, biologiste

Géographie :

- Péninsule du Yucatan, Mexique

GRANDS POINTS

Cénotes : origines, évolution, fonctionnement

Péninsule du Yucatan : 300 km d'avancées dans la mer des Caraïbes et le Golfe du Mexique. Cette péninsule compte **2000 cénotes classés au patrimoine mondial de l'Unesco**. Mais elle en abriterait, en réalité, **plus de 10 000**, difficilement identifiables et repérables car ils sont cachés par la forêt. Les scientifiques, comme par exemple Mario Rebolledo Vieyra, géophysicien, peuvent ainsi faire appel aux populations locales, notamment aux petits exploitants agricoles, qui connaissent parfaitement le terrain et utilisent l'eau des cénotes pour leurs activités.

Les cénotes sont des cavités **rocheuses creusées dans la roche calcaire, devenues apparentes par l'érosion du plafond (une couche calcaire) au dessus de grottes souterraines**. Ces cavités peuvent être remplies entièrement ou seulement partiellement d'eau.

Ces cénotes sont reliés dans un vaste et complexe réseau souterrain : l'**aquifère**.

Formation du Yucatan

Le Yucatan s'est formé sous la mer. Les coquillages et organismes vivant dans les océans se sont déposés, au fil du temps, dans les fonds marins, se sont compressés et on créé ainsi une couche calcaire pouvant atteindre plusieurs kilomètres d'épaisseur (elle fait 6 à 7 km d'épaisseur dans la région du Yucatan). Il y a 250 millions d'années, la Terre ne ressemblait pas à la planète que l'on connaît aujourd'hui. Les mouvements des plaques tectoniques, au fur et à mesure du temps, ont fait surgir, avec la baisse du niveau de la mer, les fonds marins. La couche rocheuse apparue du fond des océans, il y a 1 million d'années, est l'Amérique centrale que l'on voit aujourd'hui.

La couche de calcaire qui recouvre la région est plus ancienne que les cénotes : elle remonte d'avant l'apparition de celles-ci. Cette roche calcaire s'est fissurée petit à petit et a contribué à créer un réseau de galeries et de grottes souterraines.

Érosion et effondrement

L'érosion due au ruissellement de l'eau de pluie, qui s'infiltré dans la roche, crée des fissures et fragilise petit à petit le plafond des grottes souterraines, qui finit par s'effondrer. Les cavités sont alors visibles de la surface et les cénotes voient le jour.

Mario Rebodello Vieyra étudie l'eau contenue dans ces cénotes (le PH, la température, les matières solides dissoutes...). **Ces données permettent de reconstituer l'histoire du cénote.** Le scientifique vérifie notamment s'il y a augmentation de matières solides dissoutes en surface. Il retrouve en effet, en partie supérieure de l'eau, beaucoup de carbonate de calcium : cette concentration est due à la roche dissoute par les eaux qui s'infiltré en surface et entraîne cette roche dans les cénotes. Les grottes continuent de s'agrandir et le plafond des cénotes continue de s'effondrer.

La carte des cénotes est donc en perpétuelle évolution. Des puits apparaissent au fil du temps et ne sont que la partie apparente du gigantesque réseau de grottes souterraines.

Il y a 12000 ans, le réchauffement du climat a provoqué la fonte des calottes polaires et l'élévation du niveau des mers. Cette eau salée s'est infiltrée dans les grottes par les galeries souterraines : une eau qui a accéléré l'érosion, notamment du plafond. Une grande partie des cénotes auraient ainsi vu le jour à partir de ce moment.

Entre eau salée et eau douce

L'eau salée provenant de l'océan ne se mélange pas à l'eau douce. Plus dense, elle reste sous l'eau douce et, avec la montée des eaux, elle repousse l'eau douce vers la surface.

Cette eau de mer crée un phénomène physique particulier : on peut en effet voir une ligne de démarcation entre l'eau salée et l'eau douce en plongée. Cette couche s'appelle l'**halocline**.

Cette halocline crée un écosystème bien particulier au sein duquel se développe une activité microbienne importante. Ces micro-organismes créent ainsi un environnement favorable à l'agrégation des particules de calcaire qui créent des structures étonnantes appelées « **cloches de l'enfer** ».

Cénotes, biodiversité et occupation humaine

Occupation humaine préhistorique

De nombreux ossements ont été retrouvés par des scientifiques au fond de certains cénotes. Le plafond, en s'effritant, a déposé sur eux des sédiments qui ont permis une très conservation des squelettes. Ces squelettes, découverts entre 1993 et 2012, ont permis de repenser l'occupation par les premiers êtres humains du continent américain.

Jeronimo Aviles, spéléologue et archéologue sous-marin, a participé à ces découvertes. Les squelettes découverts dans la grotte de Tulum, ont été datés **entre 9000 et 13 500 ans**. Cette datation a permis de découvrir que les êtres humains de la préhistoire avaient occupé la péninsule du Yucatan : il s'agit de la population humaine la plus ancienne découverte d'Amérique.

Ces découvertes permettent également de confirmer que les cénotes n'ont pas toujours été remplies d'eau. Exemple : une stalagmite qui s'est formée sur un squelette, à plus de 1000 mètres de l'entrée de la grotte et qui a plus de 1000 ans. Les stalagmites ne grandissent que dans un environnement sec, ce qui prouve que la grotte n'était pas submergée à l'époque de sa formation.

Cénotes et galeries souterraines : une ressource vitale

Aucune rivière ne traverse la région du Yucatan, l'eau douce ne provient que des souterrains. L'ensemble des cénotes forme l'**aquifère** : un réseau d'eau douce **qui concentre 1/3 de l'eau douce du Mexique**.

Cercle vertueux : **l'eau contenue dans les cénotes permet le développement d'une couverture végétale et la couverture végétale dense au dessus des cénotes aide l'eau à entrer dans l'aquifère**. Les racines s'infiltrant dans la roche pour atteindre l'eau contenue dans les cénotes : accentue la fragilisation des parois rocheuses des cénotes. Ce système permet à la biodiversité végétale de se développer : une végétation qui abrite, à son tour, une riche biodiversité animale - **la forêt tropicale de la péninsule du Yucatan abrite 2300 espèces animales**.

Le jaguar, animal emblématique de la région et plus grand félin d'Amérique, est aujourd'hui en danger. Les cénotes sont un refuge pour ce mammifère, qui y trouve une source d'eau mais aussi un terrain de chasse où les proies viennent s'abreuver.

L'élévation du niveau de la mer a rendu accessibles les poches d'eau douce à la surface et ont ainsi permis **l'occupation du territoire par les populations locales, notamment les Mayas**. Aujourd'hui, les cénotes cachés dans la forêt permettent aux agriculteurs de mettre en place des petites exploitations vivrières. L'eau est utilisée pour l'agriculture mais aussi tout simplement pour la consommation quotidienne des habitants.

La forêt fut également longuement exploitée. Certains savoirs-faires traditionnels continuent d'être transmis de génération en génération par les Mayas.

Exemple : le **sapotillier**, un arbre dont on récolte la sève, le chiclé, qui permet de produire une gomme à mâcher. Des gestes précis permettent d'exploiter l'arbre sans le faire mourir et ainsi d'exploiter l'écosystème sans déforester.

Mayas

Les cénotes jouent ainsi un rôle important : écologique mais aussi agricole, social et religieux.

Très présents dans la culture Maya : sont considérés comme des portes d'entrée vers l'inframonde. En plus d'apporter une ressource vitale, ils sont une zone sacrée, qui offre des plantes très utilisées dans la médecine traditionnelle.

Depuis le 2ème siècle après JC : les Mayas se sont installés dans la péninsule. Ils sont plus de 3 millions aujourd'hui dans la région. Le mot cénote vient du maya « **dz'onot** » qui signifie « **puits rempli d'eau** ». Ils pouvaient être utilisés comme lieu de vie mais aussi comme lieu sacré (endroits du cénote utilisés comme sorte de mausolées).

Les cénotes étaient également vénérés car c'est grâce à eux que les Mayas purent prospérer. L'effondrement de la civilisation fut causée par plusieurs facteurs : des conflits entre cités, l'intensification des cultures qui appauvrissaient le sol mais aussi le tarissement des cénotes, à cause d'épisodes de sécheresse répétés et d'une déforestation intensive.

Activités humaines et impacts : nécessité de l'étude des cénotes

Les activités humaines contemporaines viennent fragiliser de nouveau cet écosystème :

- déforestation
- carrières d'extraction du calcaire qui mangent du terrain sur le couvert forestier
- pollution par des composants industriels et des rejets des cosmétiques et produits ménagers

L'étude des cénotes et du réseau complexe de grottes et galeries souterraines est essentielle pour mieux comprendre comment les protéger et permettre une occupation durable par les humains de la péninsule du Yucatan.

Campagne de cartographie :

Une grande partie du réseau de souterrain est encore inconnue et les scientifiques ne comprennent que très peu le fonctionnement et la communication de l'eau dans ce réseau. Une longue campagne de cartographie est lancée. Mario Rebolledo Vieyra et Mariana Gómez-Nicolas y sont impliqués.

L'aquifère s'étend jusque sous la mer et débouche dans les « ojos de agua » : des extrémités du labyrinthe souterrain qui écoule l'eau accumulée au niveau des cénotes de la péninsule dans la mer. Grâce à des câbles équipés de capteurs, posés sur le fond, les scientifiques tentent de construire des images du sous-sol en le scannant.

L'ojo de agua, filmé dans le documentaire, est situé près d'une côte peu occupée et préservée.

Pourtant, des études ont montré la présence d'une grande concentration de polluants dans cette résurgence. Cela illustre bien la grande connexion entre les cénotes et le réseau de galeries souterraines.

Etude de la situation écologique des différents cénotes :

Efrain Chavez, biologiste, étudie les cénotes pour mieux comprendre la situation écologique de chacun. La biodiversité animale présente dans les cénotes a réussi à s'adapter aux nombreux changements de cet habitat. Les espèces ont su survivre dans un environnement bien particulier. Elles sont souvent blanches et n'ont pas d'yeux, elles présentent souvent un métabolisme lent qui requiert peu d'oxygène, comparé à ceux des espèces similaires qui vivent dans les océans. Ces populations animales sont en général peu nombreuses et donc d'autant plus fragiles et importantes à protéger.

Etudier ces espèces animales permet aux scientifiques d'en savoir davantage sur les cénotes eux-mêmes. Cela permet de savoir si il y a une halocline, de quels nutriments les espèces ont besoin et donc de la présence ou non de ces nutriments dans leur environnement... Les scientifiques tentent de comprendre également si les espèces peuvent être de bons indicateurs de pollution.

Etude géochimique des polluants présents dans l'eau :

Flore, géochimiste, prélève quant à elle des échantillons d'eau à différentes profondeurs pour vérifier si des polluants sont présents : d'origine industrielle ou domestique.

La problématique des cénotes : contrairement à un fleuve visible dont on connaît le parcours, de nombreuses inconnues demeurent sur les cénotes : d'où l'eau vient-elle, où va-t-elle... ? Cela rend plus complexe l'identification des actions nécessaires à mettre en place pour préserver la qualité de l'eau. Comprendre comment fonctionne l'intégralité du réseau permettra de faciliter ces études et d'identifier les leviers d'actions possibles.

Car la pollution s'est intensifiée au cours des 10 dernières années. En cause notamment : l'industrie, qui utilise des produits chimiques de plus en plus agressifs et polluants mais aussi le développement du tourisme.

Citations issues du film, pistes de réflexion

« L'humanité s'est développée autour de zones d'eau. Les cénotes étaient magiques et mystiques pour les Mayas. Ils avaient un grand respect pour les cénotes. Ils y déposaient des offrandes. Le dieu le plus important des Mayas vivait ici, dans les cénotes. Le système des cénotes est très important à tout point de vue : environnemental, social, économique et aussi religieux. »

Citation de Flor Arcega, géochimiste à l'université autonome nationale du Mexique

« L'effondrement de la civilisation maya est probablement liée à des conflits entre cités et à une intensification des cultures appauvrissant les sols. Mais le tarissement de l'eau des cénotes, dû à des épisodes de sécheresse répétée et accentuée par une forte déforestation, aurait aussi participé à leur perte. C'est l'exemple même d'une civilisation sophistiquée qui aurait provoqué son propre déclin. »

« L'Homme provoque la montée du niveau de la mer qui pourrait faire disparaître une partie des cénotes et rendre l'eau impropre à la consommation. A l'image de ces milliers de racines qui puisent l'eau dans le monde des morts pour faire naître la vie, ici comme ailleurs, le sort des Hommes est scellé aux entrailles de la terre. »