



CONGO – Cirque de Diosso : cirque d'érosion de la "Série des Cirques" cartographiée sur les piémonts des versants atlantiques du Congo et du Gabon, dans des dépôts alluviaux et colluviaux, associés à des encroûtements ferralitiques, attribués au Plio-Pleistocène (âge approximatif) – crédit photo : Callec et al. (2015)*

SGF



REUNION DES SCIENCES DE LA TERRE (RST) – 26-30 Octobre à Lyon :
LA RST AURA BIEN LIEU !

<https://rst2020-lyon.sciencesconf.org>

FRANCE : Journées Nationales de la Géologie – 2 au 4 octobre 2020.

<https://www.geosoc.fr/journees-nationales-de-la-geologie-2020.html>



• Actualités

BANQUE MONDIALE – MINERALS FOR CLIMATE ACTION : les mesures envisagées contre le réchauffement climatique vont entraîner un besoin important en minéraux (graphite, lithium, cobalt...). Pour faire face à ce défi la Banque Mondiale lance la **Climate-Smart Mining Initiative** afin d'assurer l'approvisionnement nécessaire avec l'empreinte carbone la plus faible possible. <http://pubdocs.worldbank.org/en/961711588875536384/Minerals-for-Climate-Action-The-Mineral-Intensity-of-the-Clean-Energy-Transition.pdf>

STABILITÉ DES HYDRATES DE GAZ DANS L'HÉMISPÈRE SUD : une campagne océanographique met en évidence des phénomènes de déstabilisation d'hydrates de gaz dans la marge brésilienne. <https://www.insu.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/degazage-massif-dhydrates-de-gaz-et-rechauffement-climatique>

A U F - CONSULTATION ÉTUDIANTS / DOCTORANTS : l'Agence Universitaire de la Francophonie lance une consultation mondiale pour mieux connaître les besoins et aspirations des étudiants et doctorants francophones. <https://enquetes.auf.org/588946?lang=fr>

COVID-19 ET BRUIT SISMIQUE : les mesures mondiales de confinement ont entraîné une réduction moyenne de 50 % du bruit sismique enregistré dans le monde. <https://www.ird.fr/sound-silence-le-bruit-sismique-dorigine-humaine-reduit-de-50-pendant-le-confinement>



• Conférences - Expositions

- **ALGÉRIE – Alger – 6-9 septembre** : 10th North Africa Petroleum Exhibition & Conference. **REPORTÉ**

VIRTUEL – EAGE – Mineral Exploration Symposium 2020 (inscription gratuite) <https://eage.eventsair.com/mineral-exploration-symposium/>

VIRTUEL – FEG – 16-18 septembre : 6th Meggen Raw Material Days. <https://www.die-ba-bdg.de/wp-content/uploads/2019/10/Online-Seminar-MRT-2020.pdf>

SÉNÉGAL – Dakar – 5-7 octobre : First EAGE Western Africa Exploration & Production Workshop. <https://eage.eventsair.com/eage-western-africa-ep-workshop/>

FRANCE – Orléans – 6 octobre : TINNOV – Créons les géosciences de demain. <https://www.brgm.fr/evenement/tinnov-2020-orleans>

FRANCE – Angers – 6-9 octobre : Congrès de la SIM 2020 (Société Industrie Minérale). <https://www.lasim.org/>

AFRIQUE DU SUD – Le Cap – 14-16 octobre : Process Mineralogy'20 – **ANNULÉ**

VIRTUEL - MAROC – 15-17 octobre : International Conference on Phosphates (ICP). <https://www.phosnet.org/phoshate-days-2020/>

AFRIQUE DU SUD – Le Cap – 18-22 octobre : IMPC 2020 – XXX International Mineral Processing Congress. <https://impc2020.com/>

MAROC – Fès – 10-18 octobre : CAG 28 “Colloquium of African Geology”. <http://gsafr.org/cag28/> **REPORTÉ**

U K – Londres – 21-22 octobre : Africa E&P Summit, <https://www.africaepsummit.com>

FRANCE - Lyon – 26-30 octobre : 27^e Réunion des Sciences de la Terre. <https://www.geosoc.fr/>

KENYA – Nairobi – 26 octobre-1 novembre : Eight Africa Rift Geothermal Conference. <http://theageo.org/#>

TUNISIE – Sousse – 28 octobre: IGCP-659 Annual Meeting <https://www.caig.org/index.php?p=IGCP-659>

ÉGYPTE – Dahab – 1-5 novembre : 4th International Symposium & Field Workshop Living with Landscapes... <http://www.dahab2020.com>

FRANCE – Lyon – 2-3 novembre : 10^e Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur. <http://www.cfgi-geologie.fr/?event=ingg-2020>

VIRTUEL NIGERIA – Abuja – 2-3 novembre : Nigeria Oil & gas Conference & Exhibition. <https://www.cwcnog.com>

TUNISIE – Sousse – 2-5 novembre : 3rd Conference of the Arabian Journal of Geosciences <https://www.caig.org>

GHANA – Accra – 2-7 novembre : 5th IGCP 638 meeting. <https://igcp638.univ-rennes1.fr/index.php/accueil/2020-meeting> **REPORTÉ**

SÉNÉGAL – Dakar – 3-5 novembre : SIM Sénégal 2020. **REPORTÉ**

FRANCE – Castelnau-Le-Lez – 9-10 novembre : Colloque GDR-rift-2020. <https://gdr-rift-2020.sciencesconf.org>

INDE – New Delhi – 9-14 novembre : 36th International Geological Congress. **REPORTÉ**

NIGERIA – Lagos – 15-19 novembre : 38th NAPE Conference. <https://conference.nape.org.ng/>

FRANCE – Strasbourg – 16-18 novembre : 1st Geoscience Engineering in Energy Transition Conference. <https://eage.eventsair.com/get2020>

FRANCE – Grenoble – 24-25 novembre : 12^e Colloque GEOFCAN. **REPORTÉ**

MAROC – El Jadida – 25-27 novembre : 8^{eme} Rencontre Internationale sur la valorisation et la préservation du patrimoine paléontologique. http://www.prehistoire.org/offres/gestion/actus_515_40371-1/huitieme-rencontre-internationale-sur-la-valorisation-et-la-preservation-du-patrimoine-paleontologique.html

KENYA – Nairobi – 7-9 décembre : First EAGE Africa and Renewable Energy Workshop. <https://events.eage.org>

PAY-BAS – Amsterdam – 8-11 décembre : 82nd Ann. Conference & Exhibition. <https://eage.eventsair.com/eageannual2020/>

FRANCE – Grenoble – mars 2021 : 12^e Colloque GEOFCAN. <https://geofcan.inrae.fr/2019/11/25/geofcan-2020-annonce-du-colloque/>

ALGÉRIE – Alger – 15-18 mars 2021 : 10th North Africa Petroleum Exhibition & Conference. <http://www.napec-dz.com>

SÉNÉGAL – Dakar – 22-27 mars 2021: 9th World Water Forum <https://www.worldwatercouncil.org/en/dakar-2021>

SÉNÉGAL – Dakar – 1-3 juin 2021: SIM Sénégal 2021. <https://simsenegal.com/fr/>

ITALIE – Naples – 7-9 juin 2021 : 1st Mediterranean Symposium on Landslides. <https://www.iaeg.info/event/1st-mediterranean-symposium-on-landslides/>

KENYA – Nairobi – 10-12 juin 2021 : 9th Africa Oil & Gas International Exhibition. <https://www.expogr.com/kenyaoil/>

FRANCE – Montpellier – 28 juin-2 juillet : IAHS 2021 Scientific Assembly. <https://iahs.info>

FRANCE – Toulouse – 30 juin-2 juillet 2021 : Earth mantle Workshop <https://sfmc-fr.org/?p=2482&lang=fr>

FRANCE – Nice – 5-10 juillet 2021 : XXIVth IPRS Congress- International Society for photogrammetry and Remote Sensing. <http://www.isprs2020-nice.com>

INDE – New Delhi – 16-21 août 2021: 36th International Geological Congress. <https://www.36igc.org>

MAROC – Marrakech – 6-9 septembre 2021: 20th General Assembly of Wegener. <https://wegener2020.sciencesconf.org>

MAROC – Fès – 10-18 octobre : CAG 28 “Colloquium of African Geology”. <http://www.fsdmfes.ac.ma/CAG28/FR>



• Projets industriels

Énergie

ALGÉRIE : signature d'un protocole concernant l'exploration pétrolière entre Sonatrach et Wintershall (Ecofin)
CAMEROUN : la Société Nationale d'Hydrocarbures va équiper six universités de laboratoires informatiques de géosciences (SNH)
ÉGYPTE : découvertes d'hydrocarbures par ENI sur les permis North El Hammad (offshore) et SW Meleiha (désert occidental) (ENI)
GABON : Total cède ses actifs offshore matures non-opérés et le terminal du Cap Lopez à Perenco (Total)
SOUDAN DU SUD : échec de l'appel d'offres d'exploration pétrolière (Ecofin)

Ressources minérales

CAMEROUN : Canyon Resources évalue les réserves de bauxite de son projet Minimi Martap à 97 MT (Ecofin)
RDC : le gouvernement autorise l'exportation de minerai de cuivre et de cobalt non transformé suite aux pénuries d'électricité (Libre Afrique)
MOZAMBIQUE : accord de partenariat pour exploiter les gisements d'or de Guy Fawkes et Boa Esperanza (Ecofin)
TOGO : mise en ligne d'un cadastre minier <https://portals.landfolio.com/Togo/FR/>
ZIMBABWE : le belge Sibleco signe un accord avec Prospect Resources pour s'approvisionner en péralite pendant 7 ans (Ecofin)

• Opportunités / Formations

10TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LAND SUBSIDENCE – IAHS : les articles sont accessibles sur le site <https://piahs.copernicus.org/articles/382/index.html>
ANR – APPEL À PARTENARIATS AVEC L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR AFRICAIN – RAPPEL : la limite de dépôt des pré-dossiers pour ce programme concernant 18 pays africains est le **22 septembre**. <https://anr.fr/fr/detail/call/appele-a-projets-specifique-partenariats-avec-lenseignement-superieur-africain/>
LANCEMENT GDR-RIFT-2020 : un colloque de lancement de ce nouveau groupement de recherche aura lieu les **9-10 novembre** à Castelnau-Le-Lez. Inscriptions avant le 19 septembre. <https://gdr-rift-2020.sciencesconf.org>
<https://en.unesco.org/news/development-educational-curriculum-and-policy-guidelines-artisanal-and-small-scale-mining>
SGA – PRÉSENTATIONS EN LIGNE : la Society for Geology Applied to Mineral deposits propose une série de conférences à suivre en ligne avec ZOOM. <https://oredepositshub.com>
7th SGA-IUGS-SEG-UNESCO Short Course on African Metallogeny – Windhoek, Namibie, 23-27 novembre: <https://onedrive.live.com/?authkey=%21AOYBOC536wb8kBA&cid=4D5F7CCA8DB222EA&id=4D5F7CCA8DB222EA%2110366&parId=root&o=OneUp>

Publications scientifiques et techniques*

**compilation sans revue des articles*

Sédimentologie – Diagenèse

Clay mineral signatures of fault-related fluid flows in a sandstone reservoir: A case study from the Teloua Formation, Tim Mersoï Basin, Niger, A.A. Elmoma et al., J. of African earth Sc.; 168, art. 103840.

Lower-middle Viséan transgressive carbonates in Morocco: Palaeobiogeographic insights, Pedro Cózar et al., J. of African Earth Sc., 168, art. 103850



Géologie structurale – Géodynamique

Surface expression of microplate boundary kinematics: An isolated abyssal hill in the Mozambique Channel, E. Wiles et al., *J. of African Earth Sc.*, 168, art. 103830.

Moho geometry beneath northern Algeria from gravity data inversion, A. Ydri et al., *J. of African Earth Sc.*, 168, art. 103851.

Growth of a thrust fault array in space and time: An example from the deep-water Niger delta, M. Pizzi et al., *J. of Structural geology*, 137, art. 104088.

The role of inherited crustal and lithospheric architecture during the evolution of the Red Sea: Insights from three dimensional analogue experiments, N. Molnar et al., *Earth & Planetary Sc. L.*, 544, art. 116377.

Recalibrating the breakup history of SW Gondwana: U–Pb radioisotopic age constraints from the southern Cape of South Africa, R.A. Muir et al., 84, p. 177-193.

The Mahelma fault: a secondary structure of the Sahel anticline? H. Moulousi et al., *Arabian J. of Geosciences*, 13, 15, art. 715.

Geological and landscape particularities of Issafen-style chevron pattern in Tata region (Anti-Atlas, South Morocco), S. Berred et al., *Arabian J. of Geosciences*, 13, 15, art. 689.

Bassins – Géologie marine – Ressources

Leaching of hazardous elements from Mozambican coal and coal ash, C.A. Marove et al., *J. of African Earth Sc.*, 168, art. 103861.

Structural controls on submarine channel morphology, evolution, and architecture, offshore Western Niger delta, Q.R. Ashiru, *Marine & Petroleum Geology*, 118, art. 104413.

Paléontologie - Paléanthropologie

The Maastrichtian–Danian transition in the northern Farafra Oasis, Western Desert (Egypt): Implications from foraminiferal paleobathymetry and paleoenvironmental reconstructions, A.S. Zaky et al., *J. of African Earth Sc.*, 168, art. 103853.

Benthic invertebrate communities as a function of sea-level fluctuations and hydrodynamics: A case from the Cenomanian–Turonian of Wadi Tarfa (Eastern Desert, Egypt), A.A. Abdelhady et al., *J. of African Earth Sc.*, 168, art. 103870.

Paleoecology and paleobiogeography of the Cenomanian–Turonian bivalves from the Southern Galala Plateau (Eastern Desert, Egypt), *J. of African Earth Sc.*, 168, art. 103873.

A new tapejarid (Pterosauria, Azhdarchoidea) from the mid-Cretaceous Kem Kem beds of Takmout, southern Morocco, D.M. Martill et al., *Cretaceous Research*, 112, art. 104424.

A diverse assemblage of pycnodont fishes (Actinopterygii, Pycnodontiformes) from the mid-Cretaceous, continental Kem Kem Group of south-east Morocco, *Cretaceous Research*, 112, art. 104456.

Planktonic foraminiferal evidence of Late Cretaceous movements in the Gulf of Hammamet area (northeastern offshore Tunisia), E. Saïdi et al., *Arabian J. of Geosciences*, 13, 15, art. 743.

9000 years of human lakeside adaptation in the Ethiopian Afar: Fisher-foragers and the first pastoralists in the Lake Abhe basin during the African Humid Period. Khalidi et al. 2020. *Quaternary Science Reviews* art. 106459

Géochimie – Géochronologie

Zircon U–Pb and Lu–Hf isotopic systems in ediacaran to Fortunian “Taourirt” granitic ring complexes (Silet and In Tedeini terranes, Tuareg shield, Algeria), A. Azzouni-Sekkal et al., *J. of African Earth Sc.*, 168, art. 103865.

ASTER mapping and geochemical analysis of chromitite bodies in the Abu Dahr ophiolites, South Eastern Desert, Egypt, T. Seleem et al., *Arabian J. of Geosciences*, 13, 15, art. 731.

Elemental substitutions and compositional evolution during tourmaline formation in metasomatic schistose rocks of Sikait area in the Southern Eastern Desert, Egypt, H. Harraz et al., *Arabian J. of Geosciences*, 13, 15, art. 694.

Clay mineral signatures of fault-related fluid flows in a sandstone reservoir: A case study from the Teloua Formation, Tim Mersoï Basin, Niger, A. Abd Elmola et al., *J. of African Earth Sc.*, 168, art. 103840.

Pétrographie – Minéralogie – Volcanologie

Mineral composition and reconstruction of the source areas of manganese-bearing alluvial deposits in the Ventersdorp area, South Africa, B.K. Pharoe et al., *J. of African Earth Sc.*, 168, art. 103841.

Socles

Stratigraphy, petrology, and geochemistry of a neoproterozoic banded iron sequence in the El-Dabbah Group, central Eastern Desert, Egypt, S. Kiyokawa et al., *J. of African Earth Sc.*, 168, art. 103805.

Petrogenesis of the Bakoudou TTGs and high-K biotite granites and associated gold mineralization, southern Gabon: An Archean example of a porphyry–epithermal transitional gold system, N.N. Mabika et al., *J. of African Earth Sc.*, 168, art. 103843.

Archean tectonics in the sangmelima granite-greenstone terrains, Ntem Complex (NW Congo craton), southern Cameroon., J.M. Akame et al., *J. of African earth Sc.*, 168, art. 103872.



Assessment of magmatic versus post-magmatic processes in the Mueilha rare-metal granite, Eastern Desert of Egypt, Arabian-Nubian Shield, A.M.A. Seddik et al., 366-367, art. 105542.

Monazite and cassiterite U-Pb dating of the Abu Dabbab rare-metal granite, Egypt: Late Cryogenian metalliferous granite magmatism in the Arabian-Nubian Shield, B. Lehmann et al., Gondwana Research, 84, p. 71-80.

Hydrogéologie

Assessment of urban groundwater vulnerability in arid areas: Case of Sidi Bouzid aquifer (central Tunisia), G. Safia et al. J. of African Earth Sc., 168, art. 103849.

The influence of angled survey lines on 2D ERT surveys using the Wenner (α) array with implications for groundwater exploration in Karoo rocks, U. Mukhwathi et al., J. of African Earth Sc., 168, art. 103875.

Water balance assessment using remote sensing, Wet-Spass model, CN-SCS, and GIS for water resources management in Saïss Plain (Morocco), A. El Garouani et al., Arabian J. of Geosciences, 13, 15, art. 738.

The EPIK multi-attribute method for intrinsic vulnerability assessment of karstic aquifer under semi-arid climatic conditions, case of Cheria Plateau, NE Algeria, A. Nekkoub et al., Arabian J. of Geosciences, 13, 15, art. 709.

Géosciences et Société

Detection of gold-bearing quartz veins in the meta-sedimentary formation in the North-Eastern Guinea using remote sensing and geophysical exploration, K.G. Tchokpon et al., J. of African Earth Sc., 168, art. 103869.

The typology of slope slides of the cliff coast of Safi-Morocco, and the role of the clay layer in triggering failure, M.A. Ougougdal et al., J. of African Earth Sc., 168, art. 103878.

Classification of geothermal systems in Madagascar, M. Rajaobelison et al., Geothermal Energy, 8, art. 22.

Who need geoscientists? M. Simmons et al., GeoExpro, 17, 3, p. 14-19.

• Dossier du mois

Cette rubrique est destinée à accueillir vos textes concernant des projets que vous menez sur le continent africain dans les domaines académiques ou appliqués, afin de faire partager avec l'ensemble de la communauté le programme, l'avancement ou certains résultats de vos travaux, un compte rendu de conférence. Des résumés de thèses récemment soutenues sont particulièrement bienvenus.

Le gisement d'hydrogène naturel de Bourakébougou (Mali) Une nouvelle source d'énergie propre et renouvelable

Alain Prinzhofer¹, Cheick Sidy Tahara Cisse² et Aliou Boubacar Diallo³

¹ GEO4U - alain.prinzhofer@geo4u.com.br

² HYDROMA - c.cisse@petroma-ca.com

³ HYDROMA - abdor@petrom-ca.com

Résumé

L'hydrogène naturel, connu sur Terre depuis presque un siècle, apparaît aujourd'hui comme une nouvelle source d'énergie potentielle pour notre futur énergétique. Parmi de nombreux pays où une exploration de cette ressource est en cours, le Mali présente le projet le plus avancé techniquement pour la connaissance et l'exploitation de ce gaz. La société Hydroma a pu, par un travail associant géophysique, géologie, géochimie et forages, montrer l'intérêt industriel de l'exploitation de l'hydrogène naturel. Ce gaz, n'émettant pas de composés carbonés lors de sa combustion, possède des temps caractéristiques de genèse et de migration comparables aux temps humains, et productible à un coût inférieur à celui de l'hydrogène manufacturé. Les quantités accumulées sont compatibles avec une exploitation industrielle, et les flux de génération estimés montrent le caractère renouvelable de ce gaz.

Le contexte géologique des gisements de gaz hydrogène en milieu continental ont un certain nombre de points communs, en particulier leur occurrence dans des formations néo-Protérozoïques, la présence de roches basiques ou ultrabasiques à proximité, et des émanations de surface diffuses appelées « ronds de sorcières ».

Introduction

L'hydrogène (ou dihydrogène, soit la molécule H₂) est devenu ces dernières années un sujet central dans la transition énergétique. Cependant, dans les modèles actuellement présentés pour notre futur énergétique, cet hydrogène est systématiquement manufacturé, ce qui en fait aujourd'hui un vecteur énergétique comme par exemple l'électricité, et en aucun cas une source comme le pétrole ou le soleil. En d'autres termes, pour utiliser l'hydrogène comme énergie, il faut une énergie primaire (hydrocarbures, nucléaire, éolien, photovoltaïque) pour le fabriquer.



Ceci explique également pourquoi encore aujourd'hui, l'essentiel de l'utilisation de l'hydrogène (représentant environ un quart du volume de gaz naturel – méthane - exploité) est dévolu à la chimie (synthèse de l'ammoniac et raffinage pétrolier). Or, cette molécule existe dans notre système Terre, et est connue depuis le début du 20^{ème} siècle (revue dans Zgonnik, 2020), même si elle est restée pendant longtemps plus une curiosité géologique qu'une opportunité pour le futur énergétique de l'humanité. Depuis les découvertes accidentelles de ce gaz dans des forages dévolus à d'autres explorations (pétrole, méthane ou aquifères), et son étude au fond des océans sur les sites hydrothermaux des rides océaniques, les géologues ont

essayé de comprendre sa genèse et son devenir, et ont découvert d'autres habitus pour ce gaz. En résumé, on trouve de l'hydrogène naturel au milieu des océans comme dit plus haut (depuis Welhan & Craig, 1979), dans les ophiolites (revue dans Vacquand et al., 2018), qui ne sont rien d'autre que des lambeaux de cette lithosphère océanique charriée dans des zones de collision, dans d'autres zones à activité hydrothermale (Minissale et al., 1997), et dans des zones cratoniques au milieu des continents (depuis Ward, 1933). Ses manifestations peuvent être sous la forme de cheminées hydrothermales sur les rides médio-océaniques (Figure 1a), de bullage dans les « blue pools » des ophiolites (Figure 1b), ou comme émission diffuse dans ce qu'on appelle maintenant des « ronds de sorcière » (Figure 1c).

On parle maintenant de « système hydrogène » (Prinzhofer et al., 2018) comme on a conçu le fonctionnement des « systèmes pétroliers » (Tissot & Welte, 1978) il y a de nombreuses décennies. L'hydrogène est produit dans une zone de genèse, et migre jusqu'à l'atmosphère par des chemins de migrations variés dans les formations géologiques. Entre ces deux événements, il peut être retardé dans sa migration et donc s'accumuler dans un réservoir. Il peut également être altéré chimiquement, ce gaz étant éminemment réactif.

La genèse de l'hydrogène peut se faire par de nombreux mécanismes, démontrés opérants, mais dont l'importance relative n'est pas encore claire. Le mécanisme le plus étudié est la réduction de l'eau par un réducteur qui est essentiellement le fer ferreux, qui s'oxyde alors en fer ferrique. Ce mécanisme est connu depuis longtemps lors des phénomènes de serpentinisation de l'olivine de la lithosphère océanique (Welhan & Craig, 1979). Cependant, d'autres habitus permettent, avec la même réaction chimique, d'obtenir la formation d'hydrogène : la décomposition de la sidérite (Milesi et al., 2016), l'altération de la biotite (Murray et al., 2020) font appel au même mécanisme de réduction de l'eau par le fer. La radiolyse dans la croûte continentale produit également de l'hydrogène (Lin et al., 2005), ainsi que la décomposition de l'ammonium des argiles lors du métamorphisme, si les conditions sont suffisamment réductrices (Guélard et al., 2018). Enfin, des sources profondes, telles que le noyau terrestre, sont également envisagées (Larin, 1993). La migration de l'hydrogène depuis sa zone de genèse jusqu'à la surface peut s'opérer en phase gaz ou en solution dans l'eau, la solubilité de l'hydrogène dans l'eau, négligeable à pression atmosphérique, pouvant être importante à forte pression (Lopez-Lazzaro et al., 2019).

Depuis quelques années, de nombreuses découvertes d'hydrogène naturel sont apparues. Il semble que ce gaz soit beaucoup plus fréquent, et en quantité permettant une valorisation, que ce qui était envisagé il y a dix ans. Parmi de nombreux projets de R&D essayant de quantifier les flux de génération d'hydrogène, et les guides d'exploration associés, un exemple est particulièrement avancé, c'est celui du Mali, où un vrai projet industriel est maintenant en place pour une valorisation de l'hydrogène naturel.



Figure 1 : évidence d'émanations géologiques d'hydrogène. a) sur une ride médio-océanique, émanation d'un « fumeur noir ». b) « Blue pool » avec bullage d'hydrogène dans l'ophiolite du Sultanat d'Oman. c) « ronds de sorcière » dans le bassin de Sao Francisco, Brésil.



L'hydrogène naturel et la géologie de Bourakébougou

En 1987, un puits à eau foré à 110 mètres de profondeur à l'orée du village de Bourakébougou (cercle de Kati) a subi un accident, une poche de gaz à la profondeur de 110 m s'étant enflammée en tête de puits. Le puits a alors été abandonné jusqu'à ce que la compagnie Hydroma l'ouvre à nouveau en 2011, en acquérant par la même occasion le bloc 25, d'une surface de 43,174 km², afin d'y faire des opérations d'exploration de ce gaz. Il s'est avéré que le gaz émis par le puits pionnier (dit Bougou-1) est composé à 98% d'hydrogène, les 2% restant étant constitués de méthane et d'azote, avec des traces d'hydrocarbures gazeux plus lourds et d'hélium. Cette découverte a permis à la compagnie Hydroma d'installer une unité pilote d'exploitation du gaz, afin d'alimenter le village de Bourakébougou en électricité. Depuis, de nombreux travaux de géologie, de géophysique et de géochimie ont été faits sur ce puits. Enfin, 24 puits supplémentaires ont été forés, cette fois dans le but de trouver de l'hydrogène. Tous les puits forés jusqu'à présent dans un cercle de 20 km de diamètre autour du village de Bourakébougou ont mis en évidence de l'hydrogène, à diverses profondeurs. Outre le réservoir situé à environ 100 mètres de profondeur, 4 autres réservoirs plus profonds ont été découverts. Un forage traversant la série sédimentaire pour atteindre le socle a montré que celui-ci était également imprégné d'hydrogène (Prinzhofer et al., 2018).

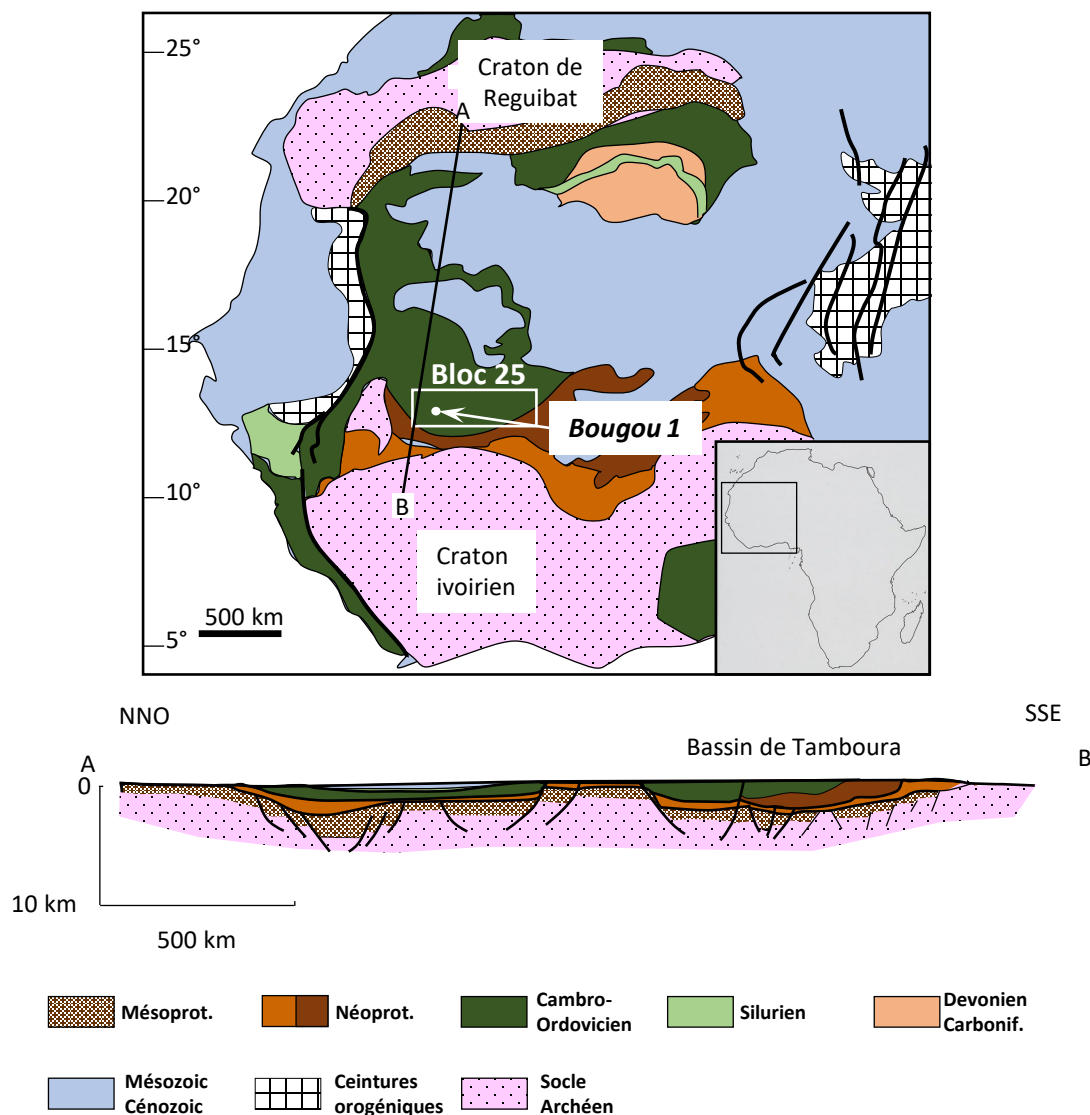


Figure 2 : Carte géologique du Bassin de Taoudeni, et section Nord-Sud montrant le style structural du bassin à la proximité des puits de Bourakebougou (Mali). Figure de Prinzhofer et al., 2018, d'après Villeneuve (2005) et Albert-Villanueva et al. (2016).



La série sédimentaire, d'environ 1400 mètres d'épaisseur, est recoupée par de nombreux sills doléritiques d'âge triasique. Cette série sédimentaire représente la partie la plus ancienne du bassin de Taoudéni (sous-bassin de Tamboura, essentiellement néo-protérozoïque), qui s'étend dans une grande partie de l'Afrique occidentale (Figure 2). Les formations paléozoïques qui la surmontent sont particulièrement développées en Algérie et présentent des systèmes pétroliers bien connus. En revanche, les roches protérozoïques sont très pauvres en matière organique, et ces dernières sont aujourd'hui hyper-matures, sans aucun potentiel pétrolier. Cette quasi-absence de carbone organique explique probablement la bonne conservation de l'hydrogène naturel produit. Sinon, ce dernier se combine très vite au carbone par la réaction de Sabatier pour former essentiellement du méthane (Smith et al., 2005).

Des « ronds de sorcière » ont été observés dans la partie est du bloc 25, et des émissions d'hydrogène ont pu y être mesurées (Prinzhofer et al., 2018).

L'état des travaux d'exploration aujourd'hui

Un relevé de sismique réflexion a été fait dans la zone de Bourakébougou, permettant d'imager les sills de dolérite et les zones pouvant potentiellement accumuler le flux d'hydrogène. D'autres travaux de magnétisme, gravimétrie, pétrographie et géochimie ont également été fait par Hydroma. Enfin, 24 nouveaux forages ont permis de définir l'étendue minimum des accumulations d'hydrogène exploitables. L'importance de ces accumulations permet d'envisager un développement industriel de cette nouvelle source d'énergie sur le court terme, le coût d'extraction de l'hydrogène naturel, en tout cas dans l'exemple malien, étant très inférieur au coût de fabrication de ce gaz, surtout si on envisage la synthèse d'hydrogène vert, issu par électrolyse d'électricité renouvelable. Un schéma représentant une coupe synthétique du champ multi-niveaux de Bourakébougou est représenté Figure 3. Le gaz se comprimant avec la profondeur (et donc la pression) de manière quasi-linéaire, pour une porosité donnée, les réservoirs les plus profonds représentent des quantités d'hydrogène de plus en plus importantes pour un même volume de roche réservoir.

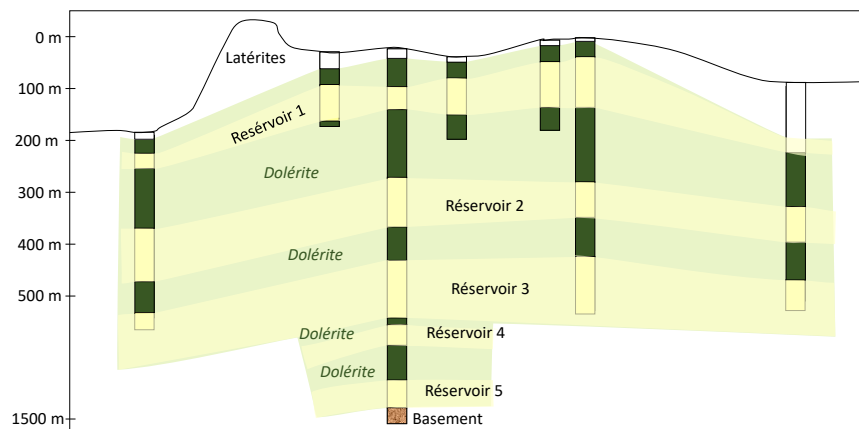


Figure 3 : : section schématique du champ d'hydrogène naturel de Bourakébougou, passant par plusieurs forages effectués dans cette zone (Prinzhofer et al., 2018)

L'exploitation pilote depuis 2011 du puits pionnier Bougou 1 a montré que pendant plusieurs années, la pression de gaz en tête de puits ne décroissait pas. Depuis un an, cette pression

augmente légèrement, ce qui ne peut être compatible avec une accumulation fossile d'hydrogène, qui s'épuiserait après exploitation comme un champ d'hydrocarbures, faisant alors baisser la pression en tête de puits. Plusieurs arguments géochimiques et physiques (en particulier la très faible stabilité chimique et la grande dispersivité de la molécule d'hydrogène) semblaient déjà indiquer que ce gaz, lorsque rencontré dans un contexte géologique donné, ne pouvait pas avoir été généré longtemps auparavant.

Des tentatives de modélisation du temps de résidence caractéristique de l'hydrogène en contexte ophiolitique indiquaient un âge entre 10 et 100 ans (Bachaud et al., 2017). Les mesures de surface dans un rond de sorcière du Brésil semblent également impliquer un flux de production compatible avec ces temps caractéristiques. Le monitoring de la pression du puits en production de Bougou 1 devrait nous donner, après une meilleure connaissance de la géométrie du réservoir, une nouvelle quantification du flux de génération et de migration de ce gaz.

Conclusions

De nombreuses études scientifiques sur l'hydrogène naturel sont en cours à travers le monde. Le potentiel de cette nouvelle source d'énergie pour l'homme paraît de plus en plus prometteur à mesure que les études s'accroissent.



Cependant, le Mali et le champ de Bourakébougou est le seul exemple où autant de forages dévolus à l'exploration de l'hydrogène ont pu quantifier le potentiel industriel de ce gaz. La société Hydroma est passée d'une phase de R&D indispensable pour un sujet aussi neuf et aussi peu maîtrisé, à un projet de valorisation industriel dont l'importance est encore probablement sous-évaluée. L'abondance des réservoirs découverts, leur faible profondeur impliquant un faible coût d'extraction, et surtout le fait que ce gaz semble être généré à une échelle de temps compatible avec son exploitation humaine rend cette source d'énergie non seulement non polluante (ne produisant que de l'eau lors de sa combustion), mais renouvelable.

Références

- Bachaud P., Meiller C., Brosse E., Durand I., Beaumont V. (2017) : Modeling of hydrogen genesis in ophiolite massif. *Procedia Earth and Planetary Science* p. 265 – 268 - 15th Water-Rock Interaction International Symposium, WRI-15
- Guélaud J., Martinez I., Sissmann O., Bordmann V. & Fleury J.M. (2018) : The role of ammonium in native H₂ production in continental lithosphere. *Goldschmidt Conference, Boston, 12-17 août 2018.*
- Larin V.N. (1993) : *The hydridic Earth. The new geology of our primordially hydrogen-rich planet.* English trad. C.W. Hunt. Polar Publishing, 247 pages
- Lin L.H., Slater G., Sherwood-Lollar B., Lacrampe-Couloume G. & Onstott T.C. (2005) : The yield and isotopic composition of radiolytic H₂, a potential energy source for the deep subsurface biosphere. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 69, No. 4, pp. 893–903
- Lopez-Lazaro C., Bachaud P., Moretti I. & Ferrando N. (2019) : Prediction of the phase behavior of hydrogen in NaCl brines by molecular simulation for geological applications. *BSGF, Earth Sciences Bulletin*, vol. 190, p. 2-15.
- Milesi V., Prinzhofer A., Guyot F., Benedetti M. & Rodrigues R. (2016) : Contribution of siderite–water interaction for the unconventional generation of hydrocarbon gases in the Solimões basin, north-west Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, Vol. 71, p. 168-182
- Murray J., Clément A., Fritz B., Schmittbuhl J., Bordmann V., Fleury J.M. (2020) : Abiotic hydrogen generation from biotite-rich granite: A case study of the Soutz-sous-Forets geothermal site, France. *Applied Geochemistry*, vol. 119, 104631
- Minissale, A., Evans, W. C., Magro, G. & Vaselli, O. 1997. Multiple source components in gas manifestations from north-central Italy. *Chemical Geology*, 142, 175-192.
- Prinzhofer A., Cissé C.S.T. & BoubacarDiallo A. (2018) : Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali). *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 43, Issue 42, , p. 19315-19326
- Smith N.J.P., Shepherd T.J., Styles M.T. and Williams G.M. (2005) : Hydrogen exploration : a review of global hydrogen accumulations and implications for prospective areas in NW Europe. In : Doré A.G. & Vining B.A. (Eds) *Petroleum Geology : North-West Europe and global perspectives – Proceedings of the 6th Petroleum Geology Conference*, 349-358, Geological Society, London.
- Tissot B.P. & Welte H. (1978) : *Petroleum Formation and Occurrence: A New Approach to Oil and Gas Exploration.* Springer-Verlag, 699 pages.
- Ward L.K. (1933) : Inflammable gases occluded in the pre-Palaeozoic rocks of South Australia. *Transactions of the Royal Society of South Australia Adelaide, Australia : Royal Society of South Australia*, v. 57, p. 42-47.
- Welhan J.A. & Craig H. (1979) : methane and hydrogen in East Pacific Rise hydrothermal system. *Geophys. Research Letters*, vol. 6, N° 11, p. 829-831.
- Zgonnik V. (2020) : *The Occurrence and Geoscience of Natural Hydrogen: A Comprehensive Review.* *Earth-Science Reviews*. Volume 203, April 2020, 103140



Société Géologique de France
Société savante reconnue
d'utilité publique, 3 avril 1832
Siège : 77, rue C. Bernard,
75005 Paris, France.

Pangea Infos a pour objectifs de favoriser le partage d'informations, de connaissances et de savoir-faire dans le domaine des géosciences au sein de la communauté des géologues actifs sur le continent africain et de promouvoir les métiers des géosciences en Afrique.

Lettre électronique d'information éditée par la Société Géologique de France

Directeur de la publication : Sylvain Charbonnier, Président de la SGF

Rédacteur en chef : Jean-Jacques Jarrige

Comité de rédaction : Véronique Gardien, Pierre Giresse, Kader Ouali Mehadji, Bruno Pagnoux, Adel Rigane, Mathieu Schuster, Amina Wafik

Ont participé également à cette lettre : Aliou Boubacar Diallo, Alain Prinzhofer, Cheick Sidy Tahara Cisse

Crédit photo : Callec, Y., Lasseur, E., Le Bayon, B., D. Thièblemont, Fullgraf, T., Gouin, F., Paquet, D., Le Metour, J., Delaye-Prat, V., Giresse, P., Malounguila-Nganga, D., Boudzoumou, F., 2015 b. Notice explicative de la carte géologique de la République du Congo à 1/100 000. Feuille Pointe-Noire, Editions BRGM.

Afin d'améliorer la qualité de la lettre **Pangea Infos**, faites-nous part de vos suggestions et commentaires à l'adresse pangea@geosoc.fr

Pour enrichir son contenu, faites nous parvenir des contributions (informations, événements, compte - rendus, publications, résumés de thèses, photos ...)

Pour intégrer ou vous retirez de la liste de diffusion de la Lettre contactez pangea@geosoc.fr

Voir aussi "Gesociences in West Africa and Maghreb":

<https://us15.campaign-archive.com/?u=71d06ba06f2ce9ae2196cca8a&id=52aad64b3d>

