

La découverte de l'hydrogène naturel par Hydroma, un « Game Changer » pour la transition énergétique

Par Asma DIALLO, Cheick Sidi Tahara CISSÉ et Jacques LEMAY
Hydroma Inc.

Et Denis Joseph BRIÈRE
Chapman Petroleum Engineering

Le dihydrogène, communément appelé « hydrogène », figure au premier rang des solutions identifiées pour atteindre la neutralité carbone. À ce jour, c'est toute une palette de couleurs, aussi riche qu'un arc-en-ciel, qui est utilisée pour le catégoriser selon son empreinte carbone et sa valeur environnementale (vert, bleu, etc.). Une couleur dont on ne parle que trop peu, c'est l'hydrogène blanc, aussi appelée « gold hydrogen », ou encore « hydrogène naturel », voire « hydrogène natif ».

L'hydrogène naturel est une nouvelle source d'énergie primaire renouvelable, qui permet d'accélérer l'atteinte des objectifs climatiques mondiaux.

À l'origine de cette découverte, faite au Mali, Hydroma Inc., la société canadienne de l'entrepreneur malien, Aliou Diallo, qui a su faire preuve de résilience et d'innovation dans un contexte sécuritaire et sous-régional complexe.

Dans cet article, nous retraçons le chemin parcouru, de la découverte de l'hydrogène naturel jusqu'à son usage dans l'unité pilote de Bourakebougou. Nous présentons également les enjeux et les perspectives de cette découverte pour le continent africain et la transition énergétique.

Introduction

L'atteinte des objectifs de décarbonation, convenus par la communauté internationale dans le cadre des Accords de Paris en 2015, nécessite de recourir à de nouvelles énergies propres en tant qu'alternative aux hydrocarbures, lesquels sont la cause première des émissions de gaz à effet de serre.

Les énergies renouvelables constituent une des solutions majeures pour décarboner le système énergétique, mais elles se révèlent très intermittentes, très difficiles à stocker et trop dispersées géographiquement.

C'est dans ce contexte que l'hydrogène, élément chimique le plus répandu dans l'univers et affichant une forte densité énergétique, peut jouer un rôle essentiel. N'émettant aucune émission de CO₂ aussi bien lors de sa combustion que de son utilisation, l'hydrogène est considéré depuis peu comme la solution incontournable pour réussir la transition énergétique.

Alors que les réflexions internationales se concentraient sur l'hydrogène vert produit à partir d'électricité renouvelable, Petroma Inc., qui s'appelle désormais Hydroma Inc., a, au début des années 2000, fait au Mali une découverte révolutionnaire, celle de l'hydrogène naturel.

La découverte d'une nouvelle source d'énergie primaire

Pour mieux comprendre cette découverte, il faut remonter à sa genèse, en 1987, lorsque le village malien de Bourakebougou, situé à 65 km de Bamako, décide d'effectuer de nouveaux forages pour trouver de l'eau.

L'un des puits forés s'avère sec, mais un villageois remarque un courant d'air qui sort du puits. Informé de la situation, le foreur revient inspecter ledit puits et, allumant une cigarette, il provoque une explosion. Il n'y eut pas de conséquences fâcheuses, mais il fallut quand même près d'un mois pour maîtriser le feu émanant du puits. Suite à la peur suscitée par l'incident, le puits fut alors colmaté et abandonné.

Deux décennies plus tard, en pleine campagne d'exploration d'hydrocarbures sur le Bloc 25, sa concession d'une superficie totale de 43 000 km² au nord-ouest de Bamako, Hydroma prend connaissance de cet incident. Des échantillons de gaz sont envoyés à un laboratoire d'Abidjan en Côte d'Ivoire. C'est ainsi qu'Hydroma apprend qu'il s'agit bien d'un gaz, plus précisément de l'hydrogène, à une teneur de 98 %.

À l'époque, la communauté scientifique est convaincue que l'hydrogène est simplement un vecteur énergétique et qu'il ne peut donc pas exister sous forme gazeuse à l'état naturel.

Hydroma fait le pari de croire en cet hydrogène naturel et entame des travaux de recherche pour mieux apprécier son potentiel.

Voilà comment va débuter une longue campagne d'exploration qui sera perturbée par la crise financière mondiale de 2008, une instabilité politique et sécuritaire au Mali depuis 2012, ainsi que par une pandémie planétaire en 2020.

Malgré tous ces obstacles, Hydroma a su faire preuve de résilience et arriver à une conclusion inattendue : l'hydrogène naturel sous forme gazeuse existe bel et bien, et le Mali dispose dans son sol de l'une des accumulations les plus importantes jamais découvertes à ce jour.

Hydroma a ainsi réussi ce que personne ne pensait possible il y a encore dix ans de cela : la découverte d'une nouvelle source d'énergie primaire renouvelable, compétitive et qui permette de croire en l'atteinte des objectifs internationaux de neutralité carbone et de développement durable.

Comment Hydroma s'y est-il pris ? C'est la grande question à laquelle nous allons maintenant répondre.

Une exploration conduite en plusieurs étapes

Première étape : Réalisation d'une campagne de mesures sismiques passives en 2008

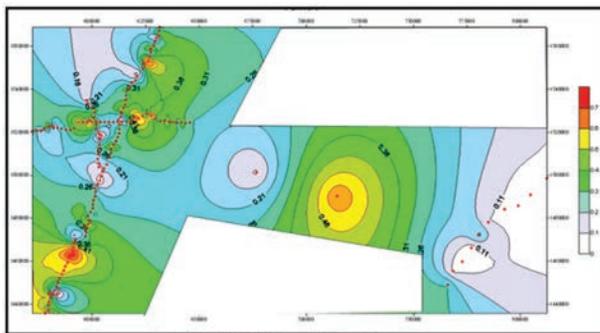


Figure 1 : Résultats des mesures sismiques passives réalisées au Mali – Source : rapport "Passive Sismique" de la Geodynamics Research S.R.L, mai 2008.

L'exploration commence par une campagne de mesures sismiques passives réalisée par Geodynamics Research S.R.L. Il s'agissait d'identifier toute anomalie gravimétrique sur une zone s'étendant sur 200 kilomètres suivant un profil Nord-Sud, puis Est-Ouest. Cinq zones potentielles sont ainsi identifiées.

C'est la première fois que cette méthode est expérimentée au Mali.

Deuxième étape : Réalisation aéroportées de levées gravimétriques et magnétiques (en 2009)



Figure 2 : Appareil utilisé pour opérer les levées aéroportées – Source : Photos Hydroma.

Afin d'identifier des anomalies d'amplitude, Hydroma a réalisé des levées d'aéromagnétisme et d'aérogravimétrie couvrant 67 200 km² par le biais de la compagnie UTS Geophysics.

Ces levées aéroportées ont permis d'identifier un certain nombre d'anomalies, surtout sur la partie ouest du Bloc 25. Ce qui est une indication directe de la présence de gaz.

Troisième étape : Une campagne de forage stratigraphique est réalisée en 2011

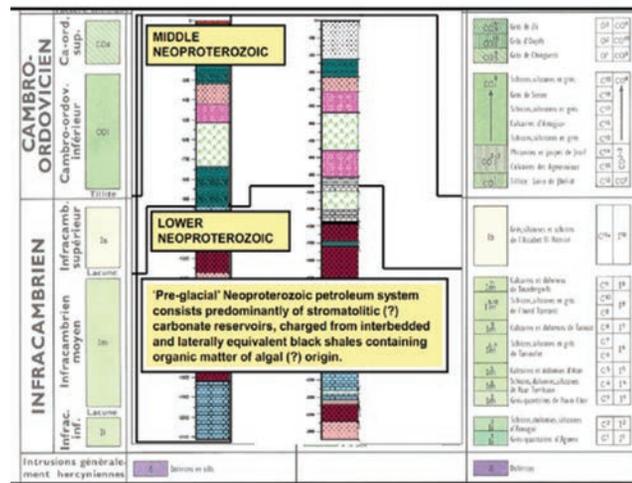


Figure 3 : Contexte géologique des forages stratigraphiques réalisés (F1 et F2) – Source : Dr. Tomasz Jerzykiewicz, Progress Report Feb. 2011 (Figure 6 du rapport).

Sur la base des résultats de l'étude sismique passive et des levées aéroportées, cinq points potentiels sont identifiés. Ils correspondent à des zones à forte probabilité de présence d'hydrocarbures.

Deux forages stratigraphiques (F1 et F2) atteignant 2 000 et 2 400 m de profondeur sont réalisés. Il s'agit une nouvelle fois d'une première pour le Mali.

Des analyses pour procéder à la datation et réaliser le Rock Eval™ des échantillons prélevés (les carottes de forage) sont effectuées. Elles confirment qu'il s'agit bien d'un bassin sédimentaire.

Pour chacun des forages réalisés, des roches réservoirs (du gré) et des roches mères (pélite et roche carbonatée, mais aussi du calcaire avec des cavités de dissolution) ont été rencontrées.

Quatrième étape : Conduite de campagnes géologiques, géophysiques et géochimiques (en 2011)

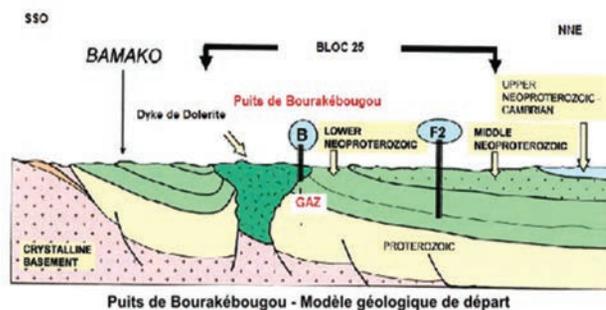


Figure 4 : Modèle géologique initial – Source : Dr. Tomasz Jerzykiewicz, Progress Report Feb 2011 (Figure 2 du rapport).

Hydroma a fait appel à Chapman Petroleum Engineering Ltd. (Chapman), des experts des systèmes pétroliers et gaziers basés à Calgary (en Alberta, au Canada), afin de déterminer la structure du système pétrolier, d'analyser les travaux réalisés et d'établir le programme de ceux à venir.

Une étude détaillée de la stratigraphie, de la sédimentologie et de la géochimie a montré une corrélation entre les strates protérozoïques du Bloc 25 et le reste du système pétrolier du bassin de Taoudenni.

En 2011, la firme Associated Geosciences Ltd. a également été mandatée pour réaliser autour du puits #1 de Bourakébougou divers travaux en matière de magnétisme, de résistivité, de gravimétrie au sol et d'imagerie sismique réflexion à haute résolution.

L'objectif était de déterminer la stratigraphie et la géologie structurale dans les environs de Bourakébougou pour affiner le modèle géologique.

Ces levées géophysiques ont permis de mieux comprendre la géométrie de l'intrusion de la dolérite, laquelle est nommée « Crawling Baby ».

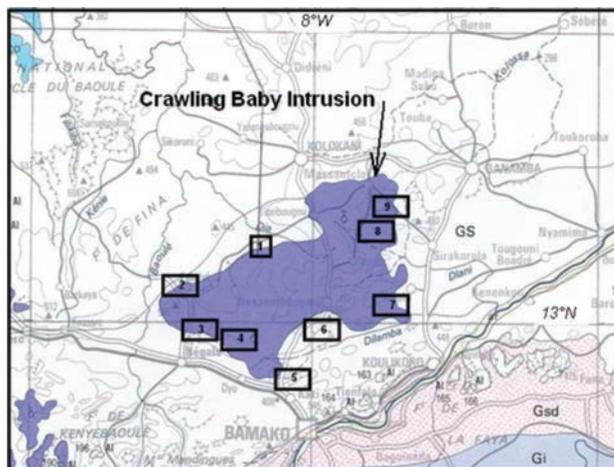


Figure 5 : Zones des explorations géologiques réalisées aux limites de l'intrusion du « crawling baby » – Source : Dr. Tomasz Jerzykiewicz, Progress Report Nov. 2011 (Figure 1 du rapport).

Cinquième étape : Le projet pilote de Bourakébougou (en 2012) – La production d'électricité sans émission de CO₂

Le puits de découverte #1 a été testé par Versatile Energy Services, société basée à Sylvan Lake (en Alberta, au Canada). La présence d'hydrogène naturel sous forme gazeuse a été de nouveau confirmée : d'une pureté de 98 %. Seules quelques traces de méthane, d'azote et d'hélium ont été mises en évidence. Une teneur qui permet d'envisager l'usage de cet hydrogène avec ou sans traitement, soit à un très faible coût.

L'hydrogène est certes utilisé dans l'industrie lourde à l'échelle internationale, mais il est complexe et coûteux à transporter en quantités importantes sur de longues distances. En revanche, il présente une forte densité énergétique massique et n'émet aucune émission de CO₂ lors de sa combustion, ce qui en fait un combustible très intéressant. Toutefois, il n'existait pas encore de cadre réglementaire au Mali, ni d'ailleurs dans le reste du monde, pour encadrer l'usage de cet hydrogène naturel. C'est pourquoi Hydroma a lancé un projet pilote visant à démontrer le potentiel d'utilisation locale de cette ressource à travers la production d'électricité.

Cela a commencé par l'obtention d'un permis d'exploitation de cet hydrogène naturel auprès des autorités nationales, là encore, une première mondiale qui aura exigé plusieurs mois de négociations avec les représentants du ministère des Mines, de l'Énergie et de l'Eau du Mali.

Une fois le permis d'exploitation obtenu, Hydroma s'est lancé dans l'installation d'une unité pilote de production d'électricité à partir d'hydrogène naturel. À travers la combustion directe de ce gaz dans un moteur de Ford V-10 de 30 KW, ce démonstrateur a permis d'assurer l'éclairage de plusieurs maisons et places publiques, ainsi que de la mosquée du village de Bourakébougou, et ce sans aucune émission de CO₂.

Il a également mis en exergue une nouvelle découverte : la dynamique de flux de l'hydrogène naturel.

En effet, contrairement aux craintes initiales sur l'épuisement du gaz au fil du temps, aucune chute de pression n'a été enregistrée durant les sept années d'exploitation opérationnelle de ce pilote. Au contraire, elle a même pu augmenter, parfois. Cette absence de déflexion a permis de conclure que le système hydrogène naturel est dynamique et peut se recharger.

L'hydrogène naturel a commencé à intriguer et les premiers reportages consacré à ce projet pilote voient le jour. En 2016, Hydroma a été convié à présenter sa découverte lors de la COP21, à Paris. Dans le même temps, Denis Brière, et Tom Jerzykiewicz, experts en géologie, en géochimie et en géoscience, publiaient un article technique portant sur le modèle géologique du bassin [1].



Figure 6 : Unité pilote de production d'électricité installée à Bourakebougou – Source : photo©Hydroma.

Sixième étape : La première grande campagne de forage et de diagrapie (de 2017 à 2019)

L'exploration s'est poursuivie avec la réalisation d'une campagne de forage par des experts internationaux, tels que GeoDrill, Semm Logging et Exlog Mudlogging.

Vingt-quatre puits ont ainsi été forés, dont treize en recourant à la technologie DDH (Diamond Drill Hole – à 5 017 m de profondeur) et onze en utilisation celle de l'AC (Air Core – profondeur de 1 936 m) pour un métrage linéaire total de 6 953 m. La présence d'hydrogène a été constatée dans tous les puits.

L'interprétation géologique et les résultats obtenus via la chromatographie mettent en évidence l'existence de plusieurs niveaux superposés d'accumulations d'hydrogène.

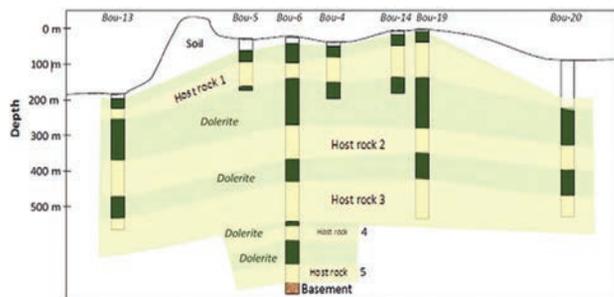


Figure 7 : Plusieurs niveaux d'accumulations d'hydrogène naturel – Source : Cheick Sidi Tahara Cissé (2018), "Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali)" (Figure 9 du rapport).

De 30 à 135 mètres pour les moins profondes et plongeant jusqu'à 1 500 mètres pour la plus profonde, ces accumulations d'hydrogène naturel sont issues de lithologies similaires et sont séparées par des couches de dolérite.

Elles sont constituées de roches carbonatées (marbre, calcaire, marne...), de grès fins-moyens et grossiers hématiques poreux, de pelite, de siltite, de brèches et, parfois, de conglomérats.

Hydroma a ainsi pu publier en 2018 un premier article scientifique portant sur l'accumulation d'hydrogène naturel de son site, dans la revue *Science Direct* (Elsevier), en collaboration avec l'expert mondial de l'hydrogène naturel, Alain Prinzoffer [2].

Septième étape : Les premières estimations et évaluations des réserves (en 2020)

Grâce à ces travaux, Chapman Petroleum Engineering a publié en 2020 un rapport d'évaluation des ressources du site, par référence à la norme NI 51-101, l'instrument national de la norme canadienne concernant les activités pétrolières et gazières.

Ce rapport a estimé les ressources contingentes à plusieurs centaines de milliards de mètres cube de gaz d'hydrogène naturel.

En parallèle, Hydroma a soutenu et financé la réalisation d'une thèse de doctorat portant sur la caractérisation des réservoirs d'hydrogène naturel, sous l'égide de l'IFP Énergies nouvelles, organisme public de recherche et de formation français. La réalisation de cette thèse est toujours en cours.

Huitième étape : Réalisation d'une nouvelle campagne de forage, de diagrapie et de tests (en 2022)



Figure 8 : Vue aérienne nocturne d'un site de forage d'Hydroma au Mali – Source : Photo©Hydroma.

En mai 2022, une nouvelle campagne de forage réalisée à faible profondeur a été engagée. Cette fois, l'objectif était de tester le premier niveau d'accumulation d'hydrogène naturel sur le site du Bloc 25.

Hydroma a mobilisé la société allemande DrillTec pour le forage, Excellence Logging Services (Exlog) pour la chromatographie, Roke Technologies pour la diagrapie, Versatile Energy Services pour les tests

sur les puits et, enfin, Vellichor pour assurer la sécurité des opérations. Tous ces travaux ont été conduits sous la supervision technique de Chapman Petroleum Engineering.



Figure 9 : Vue aérienne de l'unité de testing d'Hydroma au Mali – Source : Photo©Hydroma.

Sur tous les puits nouvellement forés, on observe la présence d'hydrogène naturel gazeux, ainsi que des traces d'hélium à chaque occurrence.

De même, tous les puits précédemment forés, dans lesquels SEMM Logging avait effectué une diaggraphie en trou ouvert, ont été de nouveau sondés en recourant au Quad Neutron Log de la société Roke Technologies. Cela a permis de confirmer la présence d'hydrogène dans toutes les zones précédemment identifiées.

Les prochaines étapes

L'objectif de la société Hydroma est clair : passer de la phase de découverte de cette nouvelle source d'énergie à une exploitation industrielle de celle-ci et participer ainsi activement à la transition énergétique avec la promotion d'une économie décarbonée au Mali et, plus largement, en Afrique et en Europe.

L'exploitation de cet hydrogène naturel commencera donc par une production d'électricité à grande échelle destinée au Mali. Dans un second temps, cet hydrogène sera exporté massivement vers l'Europe et l'Allemagne, sous forme gazeuse ou d'ammoniac.

Quelles perspectives pour l'hydrogène naturel en Afrique et dans le monde ?

À travers son programme d'exploration, son projet pilote de Bourakebougou et son engagement sur la scène internationale, Hydroma est devenu le pionnier de la découverte, de la recherche, de la promotion et de l'exploitation de l'hydrogène naturel dans le monde.

Une filière hydrogène naturel qui se développe dans le monde entier

Grâce aux données cumulées au fil des ans, Hydroma a acquis une meilleure compréhension du système géologique afférent à l'hydrogène naturel, notamment la dynamique de flux qui s'y opère.

Depuis quelques années, la communauté scientifique de plusieurs pays commence à se pencher à son tour sur la question de l'hydrogène naturel.

En France, Alain Prinzofer et Isabelle Morretti sont les têtes de file du mouvement. Leur action se traduit au travers de plusieurs publications et initiatives, notamment l'organisation en 2021 et 2022 de la conférence Hnat Summit, le premier événement mondial portant sur le sujet.

En Allemagne, le BGR – l'Institut fédéral des géosciences et de ressources naturelles – a identifié dans le monde dix-sept localisations où l'hydrogène naturel est présent [3].

Ce n'est pas tout. L'Australie, le Texas, le Maroc, le Brésil, la Colombie, la Russie, l'Afrique du Sud, Djibouti, la Namibie, et bien d'autres pays encore, comme la Mauritanie, ont également entamé des recherches et des réflexions sur ce sujet.

Le potentiel renouvelable de l'hydrogène naturel

La multiplication de ces travaux de recherche ont permis de mettre en avant différentes hypothèses sur la genèse de cet hydrogène.

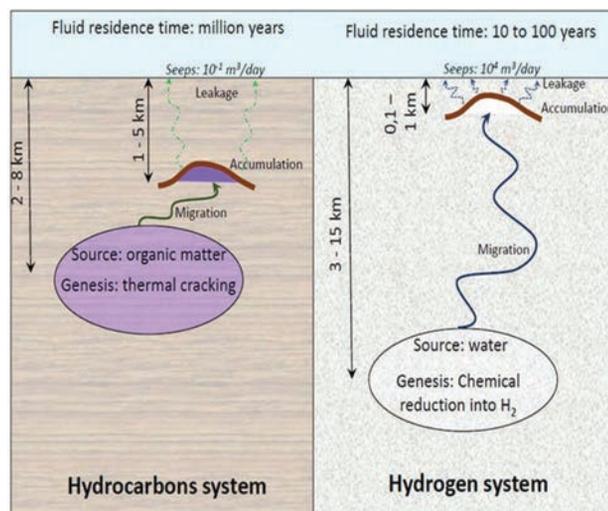


Figure 10 : Comparaison entre l'hydrogène naturel et les hydrocarbures – Source : Geo4u.

Plusieurs origines de ce gaz ont été identifiées à ce jour : il résulterait d'un processus de serpentinisation, de radiolyse, de la collision entre les plaques tectoniques au niveau des failles, de l'électrolyse naturelle de l'eau ou encore d'un dégazage mantellique [3].

Ce qui est intéressant, c'est que pour toutes les sources identifiées, le phénomène de génération d'hydrogène naturel provient d'une réaction chimique qui s'apparente à un flux.

Une dynamique de flux qui, selon les recherches de Geo4u, semble se régénérer à l'échelle de la décennie et non du millénaire, comme c'est le cas pour les hydrocarbures (voir la Figure 10 ci-dessus).

Selon le Larousse, une énergie est considérée comme renouvelable si elle provient « de ressources inépuisables ou se renouvelant rapidement à l'échelle humaine, par opposition aux sources d'énergies fossiles, dont les stocks sont limités et non renouvelables à l'échelle humaine. »

Avec sa dynamique de flux – et non de stock –, qui se régénère à l'échelle de la décennie, on peut conclure que l'hydrogène naturel est bel et bien une énergie renouvelable. Mais quel est son véritable potentiel économique ?

Le potentiel économique et social de l'hydrogène naturel

En 2021, le marché de l'hydrogène, dans le monde, représentait 90 millions de tonnes d'hydrogène, un gaz utilisé principalement pour la fabrication d'ammoniac servant pour la production de fertilisants et, dans les raffineries, à la désulfuration des carburants.

Cet hydrogène est à 95 % produit à partir d'hydrocarbures, principalement du gaz naturel. Sa production émet en moyenne l'équivalent de 10 à 13 kg de CO₂ par kg d'hydrogène. Son coût de production est estimé entre 1,5 et 2,5 €/kg. Avec l'augmentation du prix du gaz naturel, suite au conflit actuel entre l'Ukraine et la Russie, le prix de cet hydrogène dit « gris » est en hausse.

À l'échelle internationale, de nombreux efforts sont fournis pour remplacer cet hydrogène gris par de l'hydrogène vert, qui lui ne génère presque aucune émission de CO₂ lors de sa production. Selon la taille des installations, le taux de disponibilité et le coût d'approvisionnement en électricité renouvelable requise, le coût de production de l'hydrogène vert en Europe varie entre 4 et 8 €/kg.

Plusieurs études anticipent de fortes réductions de ces coûts d'ici à 2030 (IEA, IRENA). Mais à ce jour, le coût de l'hydrogène vert européen reste encore trop souvent élevé pour l'industrie lourde.

Dans ce contexte global où l'hydrogène est perçu comme la solution clé pour atteindre la neutralité carbone, l'hydrogène naturel représente donc un excellent candidat en raison de son faible coût de production, de sa durabilité et des centaines de milliards de m³ de ressources estimées au Mali.

Avec tous ses atouts, l'hydrogène naturel se positionne véritablement comme un « Game Changer » pour accélérer la transition énergétique en Afrique et dans le monde.

En effet, grâce à la faible profondeur à laquelle les accumulations se situent, les premières estimations d'Hydroma permettent d'envisager un coût d'extraction à moins de 1 € par kilogramme d'hydrogène naturel, ce qui représente une véritable révolution par rapport à l'hydrogène gris ou vert.

À un tel coût, l'hydrogène naturel représente une solution compétitive pour le développement de nouvelles infrastructures et l'amélioration de la qualité de vie en Afrique. Tout d'abord à travers la production massive d'électricité renouvelable et le déploie-

ment d'une mobilité « Zéro émission », mais aussi à travers l'émergence d'une industrie lourde décarbonée (les raffineries, la sidérurgie, les mines et la production d'engrais).

Le développement d'une filière africaine de l'hydrogène naturel permettra également l'essor d'un nouveau secteur industriel au Mali et sur le continent africain, avec la mise en place d'une chaîne de valeur complète : production, stockage, transport, distribution et usage local. Cela représente de fortes perspectives de croissance à la fois économique et sociale liée à la création d'emplois et à la formation.

Par ailleurs, en mai 2022, la Commission européenne a estimé à 10 millions de tonnes d'hydrogène renouvelable les besoins d'import de l'Europe d'ici à 2030. Cet import à grande échelle de cet hydrogène naturel sous forme gazeuse ou d'ammoniac est aussi pour l'Europe une solution compétitive pour accélérer sa transition énergétique.

Conclusion

L'hydrogène naturel est donc bel et bien une nouvelle source d'énergie primaire renouvelable ; elle est déjà disponible en très grande quantité au Mali.

Grâce à sa compétitivité économique et sa durabilité, l'hydrogène naturel peut jouer un rôle clef pour faciliter et accélérer la transition énergétique en décarbonant de nouveaux secteurs, tels que la mobilité et l'industrie lourde.

L'hydrogène naturel et l'hydrogène vert (produit par électrolyse de l'eau) sont tous deux renouvelables et sont l'un comme l'autre nécessaires pour atteindre les objectifs de neutralité carbone d'ici à 2045. Pourtant, seul l'hydrogène vert est aujourd'hui promu et soutenu à l'échelle mondiale.

Officiellement, seule l'Allemagne inclut l'hydrogène naturel dans sa stratégie nationale d'hydrogène, qu'elle a publiée en juin 2020.

Dans un contexte climatique où le temps presse et où l'hydrogène est reconnu comme LA solution pour accélérer la transition, il est temps pour la France et l'Union européenne, et plus largement pour la communauté internationale, d'élargir le champ des possibles et de reconnaître l'intérêt de l'hydrogène naturel et de soutenir le développement à une plus grande échelle de cette filière.

Conscient du potentiel de l'hydrogène renouvelable pour le continent africain et convaincu de la complémentarité de l'hydrogène naturel avec l'hydrogène vert, Hydroma a, depuis quelques années, diversifié ses activités en matière de développement de projets d'hydrogène vert, notamment en Mauritanie, au Sénégal, au Niger et dans plusieurs autres pays, et ce dans le cadre de son initiative West African Big Green Deal (WABGD). Cette initiative publique mais aussi privée vise à valoriser le très haut niveau d'ensoleillement, de vent et d'hydraulique dont bénéficie l'Afrique de l'Ouest pour participer à la production massive d'hydrogène vert et de ses produits dérivés, tels que l'ammoniac.

Avec l'hydrogène naturel et l'hydrogène vert, Hydroma compte devenir le leader mondial de l'hydrogène renouvelable et positionner l'Afrique en tant que champion de la transition énergétique.

Bibliographie

[1] BRIÈRE D. & JERZYKIEWICZ T. (2016), "On generating a geological model for hydrogen gas in the southern Taoudeni Megabasin (Bourakebougou area, Mali)", Barcelona (Spain).

[2] PRINZHOFER A., CISSÉ Tahara C. S. & DIALLO A. B. (2018), "Discovery of a larg accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali)", *Int. J. Hydrog. Energy* 43, pp. 19315-19326.

[3] FRANKE Dieter, BLUMENBERG Martin & PEIN Martin (2020), "Wasserstoff vorkommen im geologischen Untergrund", *Commodity TopNews* 63.