



## Concept d'identification des accumulations naturelles d'hydrogène par technologie de télédétection



2024



## 1. Principes d'identification des anomalies d'hydrogène

L'hydrogène est un gaz présent dans l'atmosphère à l'état de traces qui ne permet pas de maintenir la vie. Il est synthétisé à partir d'hydrocarbures et d'eau. L'hydrogène gazeux constitue la fraction la plus légère de la molécule H<sub>2</sub>O. L'hydrogène est à la fois le plus léger et le plus basique de tous les éléments. C'est un gaz assez réactif, qui entre en combinaison chimique avec la plupart des éléments et est faiblement repoussé par les forces magnétiques.

L'hydrogène naturel peut être trouvé dans des gisements souterrains et généralement extrait d'une manière similaire au gaz naturel.

Une grande partie de la physique est consacrée à l'étude des effets produits au sein de divers matériaux par l'application d'un champ magnétique. Dans l'atome d'hydrogène, un noyau comportant un seul proton chargé positivement, qui reste stationnaire, est entouré d'un seul électron chargé négativement. Une telle configuration peut donner l'impression que l'hydrogène possède une attraction magnétique puissante, mais ce n'est pas le cas. Le gaz d'hydrogène n'est en effet que très faiblement magnétique. La raison en est que les atomes d'hydrogène ne se trouvent pas isolés. Ils sont liés entre eux pour former une molécule, qui a une énergie chimique plus faible que les atomes séparés. Au sein de cette molécule, l'impulsion d'un électron se déplace dans la direction opposée à celle de son voisin. En raison de ce phénomène, la molécule n'est que faiblement magnétique et est considérée comme dépourvue de moment magnétique permanent.

L'hydrogène est une substance diamagnétique. Le diamagnétisme se produit dans les matériaux dont les atomes possèdent des électrons appariés. Selon la loi de Faraday, lorsqu'une molécule d'hydrogène est exposée à un champ magnétique, ses électrons qui sont en orbite modifient légèrement leur moment. Lorsque le champ magnétique augmente, un champ induit est créé, que les électrons de la molécule ressentent comme une force. Grâce à ce principe de physique, la molécule d'hydrogène acquiert un moment magnétique induit.

L'effet photoélectrique a fourni une preuve indiscutable de l'existence du photon et donc du comportement particulaire du rayonnement électromagnétique. Le concept de photon est né de l'expérimentation sur le rayonnement thermique, un rayonnement électromagnétique émis en raison de la température d'une source, qui produit un spectre continu d'énergies. Des preuves plus directes étaient nécessaires pour vérifier la nature quantifiée du rayonnement électromagnétique. Dans cette section, nous décrivons comment l'expérimentation sur la lumière visible a fourni cette preuve.

Bien que les objets à haute température émettent un spectre continu de rayonnement électromagnétique, un autre type de spectre est observé lorsque des échantillons purs d'éléments individuels sont chauffés. Par exemple, lorsqu'une décharge électrique à haute tension traverse un échantillon de gaz hydrogène à basse pression, les atomes d'hydrogène individuels isolés résultant de la dissociation de H<sub>2</sub> émettent une lumière rouge. Contrairement au rayonnement du corps noir, la couleur de la lumière émise par les atomes d'hydrogène ne dépend pas beaucoup de la température du gaz dans le tube. Lorsque la lumière émise traverse un prisme, seules quelques lignes étroites, appelées spectre de raies, sont émises ou absorbées, plutôt qu'une gamme continue de longueurs d'onde, plutôt qu'une gamme continue de couleurs. La lumière émise par les atomes d'hydrogène est rouge car, parmi ses quatre lignes caractéristiques, la





la ligne la plus intense de son spectre se trouve dans la partie rouge du spectre visible, à 656 nm.

Les propriétés de l'hydrogène décrites ci-dessus sont à l'origine des principes des manifestations naturelles de l'hydrogène à la surface de la Terre et de leur identification et délimitation ultérieures en tant qu'anomalies.

## 2. Approche par télédétection pour l'identification des anomalies d'hydrogène

Nous utilisons la technique brevetée de traitement des relevés par télédétection pour identifier et cartographier avec précision les anomalies associées à divers minéraux et substances (pétrole, gaz, or, uranium, cuivre, eau, hydrogène, etc.).

La télédétection est utilisée depuis de nombreuses années pour l'exploration des minéraux. Elle consiste à recueillir des informations sur le monde physique en mesurant le rayonnement électromagnétique, les particules et les signaux de champ qui émanent des objets. À ce jour, l'imagerie par satellite est largement utilisée comme outil d'exploration. La télédétection utilise des signatures spectrales. Pour un matériau donné, la quantité de rayonnement solaire qu'il réfléchit, absorbe, transmet et émet varie en fonction de la longueur d'onde. Lorsque la quantité de rayonnement ou d'énergie électromagnétique d'un objet est tracée sur une plage de longueurs d'onde, les points connectés produisent une courbe appelée signature spectrale du matériau. Plus de 4 000 minéraux naturels peuvent être trouvés sur terre, et chacun a sa propre composition chimique unique et sa fréquence inhérente. La quantité de rayonnement solaire qu'un minéral ou une substance réfléchit, transmet et émet en raison de sa composition chimique est comme une empreinte digitale, ou ce que l'on appelle une signature spectrale. En mesurant les minuscules variations de longueur d'onde avec la télédétection, la signature spectrale d'un minéral ou d'une substance peut souvent être identifiée depuis l'espace.

Tous les objets ont une signature spectrale unique et les objets similaires partagent une signature spectrale. Une fois que nous avons identifié la signature spectrale d'un objet, la même signature peut être recherchée dans d'autres ensembles de données pour trouver des modèles et des objets similaires. Les champs électromagnétiques inhérents (spectres) existent sur chaque type d'accumulation (pétrole, gaz, eau, hydrogène) ou de gisement (or, uranium, cuivre, etc.). Ces champs électromagnétiques (d'une fréquence spécifique) se forment sur les accumulations ou le gisement et se manifestent à la surface du sol en raison de divers processus chimiques, thermiques et électrochimiques dans les roches avec une migration prolongée du pétrole, des gaz (autres métaux dans les minerais) des grandes profondeurs vers la surface du sol. Les accumulations et les gisements de minerais et leurs minéraux/substances constitutifs ont des propriétés caractéristiques qui sont visibles à l'aide de différentes longueurs d'onde de lumière au-delà de la plage visible. Ces propriétés uniques peuvent être évaluées pour cartographier la distribution de minéraux spécifiques.

Nous analysons les images spectrales obtenues à partir des satellites d'observation de la Terre pour identifier et cartographier les signatures minérales (champs électromagnétiques). Certains satellites ont une qualité spectrale et radiométrique si élevée que nous pouvons mesurer les fuites de gaz dans l'atmosphère après avoir appliqué les corrections atmosphériques appropriées aux données.

Le traitement des images satellite est une procédure bien établie qui a été utilisée par de nombreuses entreprises. Nous utilisons des images satellite de type numérique et analogique, ces dernières étant indispensables car les longueurs d'onde y sont conservées. [En plus des images satellite standard](#)





Dans le cadre du traitement des images satellites dans le domaine visible, des spectres IR et UV, nous utilisons un traitement d'image innovant breveté dans le domaine invisible du rayonnement électromagnétique. Les spectres invisibles des champs électromagnétiques caractéristiques sont « visualisés » sous forme de « zones de haute luminosité » sur des images satellites analogiques à haute résolution. Le traitement comprend l'application de réactifs chimiques spéciaux (nanogels), de phosphores, de sensibilisateurs, qui sont sélectionnés pour chaque type d'accumulation (dépôt) suivi d'un traitement dans un réacteur nucléaire de petite taille. Il permet d'améliorer les anomalies identifiées et de les rendre visibles et interprétables géologiquement. Le réacteur nucléaire permet d'améliorer la visualisation des anomalies identifiées en établissant une résonance des fréquences des éléments de référence dans les nanogels et les images satellites.

### 3. Estimation de la profondeur d'occurrence

La méthode de prédiction de la profondeur est basée sur un changement de position des limites des anomalies (déplacement de la limite de l'énergie maximale du signal) avec différentes inclinaisons des orbites des satellites et des paramètres géométriques de la localisation des satellites par rapport à l'anomalie.

La profondeur d'occurrence à l'étape 1 est estimée à l'aide d'au moins deux images satellites prises à partir de 2 satellites, mais avec des inclinaisons orbitales différentes. À partir de l'analyse de ces images, la « valeur de décalage » de la limite de l'anomalie est déterminée. Connaissant les angles d'inclinaison des orbites (c'est-à-dire l'angle sous lequel l'anomalie est enregistrée) et une jambe (« valeur de décalage » des limites de l'anomalie), la deuxième jambe (c'est-à-dire la profondeur d'occurrence) est estimée. Voir ci-dessous

Dans le cadre de l'évaluation du site, le Groupe Poisk traite un certain nombre d'images satellites prises sous différents angles (Fig.1).

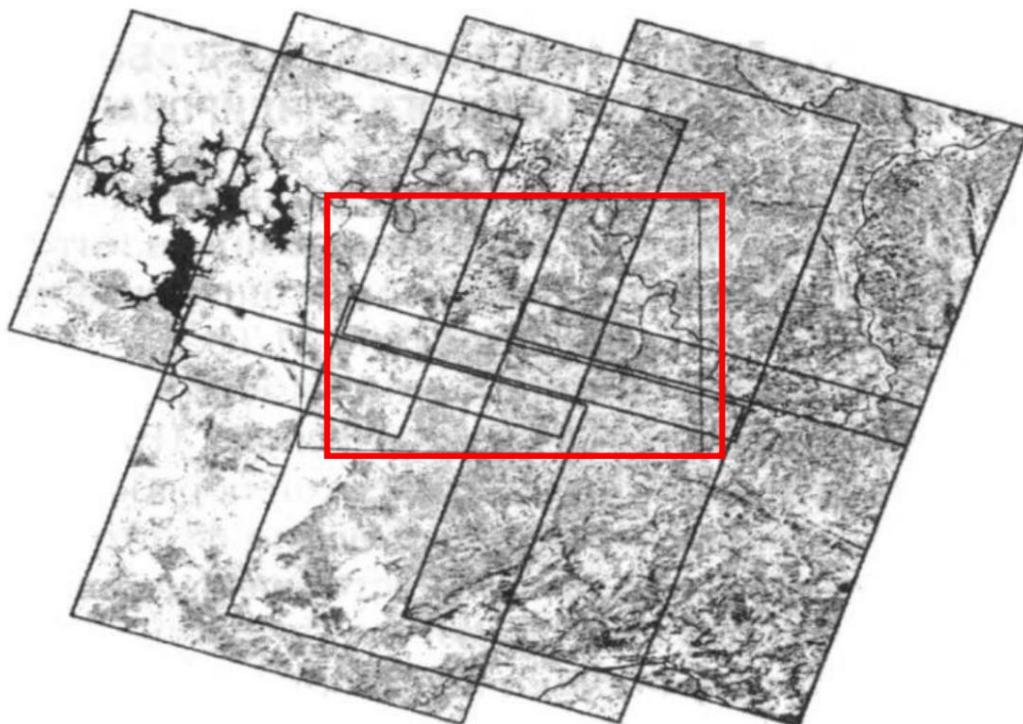


Photo 1. Exemple d'images satellite couvrant une zone de recherche (indiquées par un contour rouge au centre)





Connaissant l'angle sous lequel une image satellite a été prise (fournie par une société d'imagerie satellite), la profondeur d'occurrence peut être calculée (Fig. 2) comme suit.

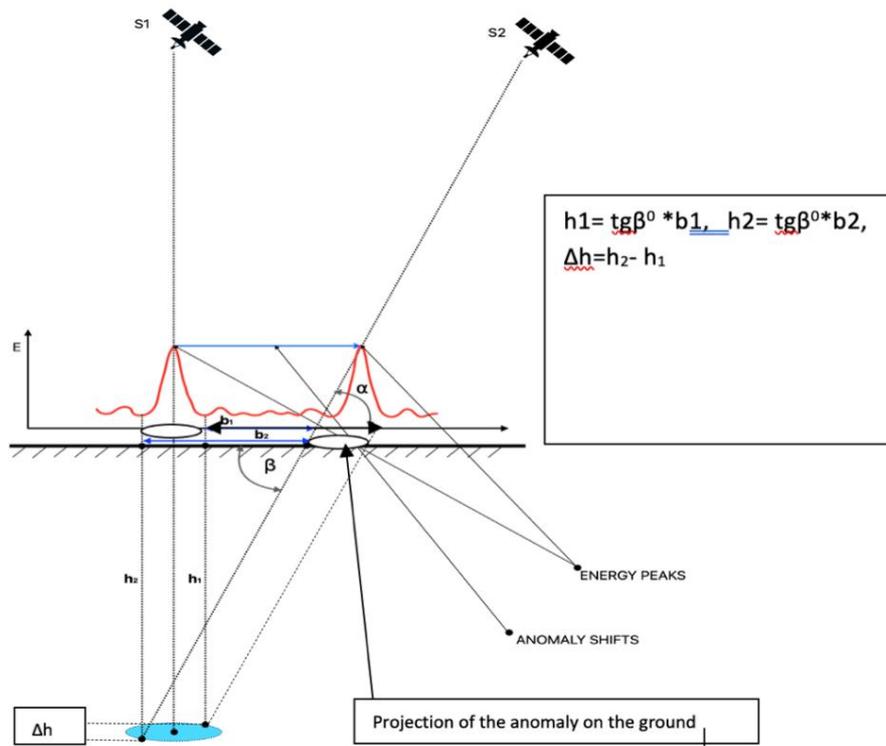


Fig. 2. Estimation de la profondeur

En analysant plusieurs images, l'ampleur du déplacement des limites de l'anomalie est déterminée, la tangente de l'angle d'inclinaison du satellite est calculée pour chaque image, la hauteur du satellite est prise en compte, puis la profondeur du haut et du bas du corps géologique sont estimées :

$$1) h_1 = \text{tg}\beta^0 * b_1, 2) h_2 = \text{tg}\beta^0 * b_2, 3) \Delta h = h_2 - h_1$$

Où

- $h_1$  – profondeur du sommet de la minéralisation -
- $h_2$  – fond de la minéralisation
- $\Delta h$  est l'épaisseur de la minéralisation -  $\beta^0$  - l'angle d'inclinaison de l'axe de l'orbite du satellite S2
- $b$  est la distance entre le point initial d'augmentation ( $b_1$ ) et de diminution ( $b_2$ ) de la valeur maximale de l'amplitude du signal et l'intersection avec la ligne d'observation satellite de la limite de l'anomalie enregistrée par le satellite S2.
- S1 est un satellite situé le plus près possible de la ligne verticale d'observation sur la zone anormale





#### 4. Prérequis géologiques

Les environnements géologiques les plus prometteurs où les gisements d'hydrogène naturel sont les plus susceptibles d'être découverts

1. Les roches ignées créent une large gamme d'environnements avec du gaz riche en hydrogène sous forme de gaz libre, de gaz dissous et d'inclusions fluides piégées dans les ophiolites, les zones de rift, les failles et le dégazage atmosphérique dans les gaz volcaniques, les geysers, les sources chaudes et les sorties de gaz de surface.
2. Les cheminées kimberlitiques sont rarement associées à du gaz riche en hydrogène, mais c'est dans celles-ci que l'on trouve aujourd'hui les débits records d'hydrogène naturel dans la cheminée kimberlitique en Russie, où le débit était de 100 000 m<sup>3</sup> par jour.
3. Les gisements de minerai sont souvent un lieu d'accumulation, à la fois dans les roches ignées et sédimentaires.
4. Les veines de charbon et/ou les carbonates présentent un potentiel élevé d'accumulation d'hydrogène.
5. À l'intérieur des inclusions de fluides gazeux ; plus la roche est ancienne, plus la teneur en H<sub>2</sub> est élevée, car le temps est le facteur principal.
6. Les sulfates d'évaporite peuvent stocker de grandes quantités de H<sub>2</sub> (jusqu'à 20 à 30 % en volume), et l'halite à forte teneur en potassium (par exemple, les gisements de K-potassium) fournit également une source hydrolytique radiogénique de H<sub>2</sub> grâce à un composé intermédiaire de métal calcium, qui, avec le sel, constitue un bon bouclier pour l'accumulation d'hydrogène.
7. Les champs de pétrole et de gaz ne contiennent généralement pas de grandes quantités de H<sub>2</sub>. Cependant, pour les champs à forte teneur en H<sub>2</sub>, la production de H<sub>2</sub> peut être rentable, en particulier lors de la production de gaz liquéfié.

La forte réactivité de H<sub>2</sub> affecte la structure et la composition chimique de la roche qu'elle traverse, par exemple, la résistance mécanique des carbonates diminue, accélère potentiellement le développement de failles sous conditions de contrainte avec la création de voies de migration supplémentaires. La teneur en H<sub>2</sub> des puits augmente généralement avec la profondeur.

Jusqu'à présent, seuls trois types de scellements pour les accumulations d'H<sub>2</sub> sont possibles : les filons-couches de roches basiques (trouvés au Mali, où la seule génération naturelle d'hydrogène pour aujourd'hui se trouve sous une roche dolérite), le sel et les schistes.

Les critères suivants pourraient être les plus importants en termes d'accumulation de H<sub>2</sub> :

- La présence de roches ultramafiques et basiques riches en fer, en particulier le socle archéen, qui peuvent être des sources potentielles d'H<sub>2</sub> radiolytique et hydrolytique.
- Des failles profondes qui permettent la migration et la concentration de sources diffuses de H<sub>2</sub>. • Un potentiel réservoir en profondeur à la limite entre le socle et les roches sédimentaires. Par exemple, le gaz naturel du puits Mt Kitty 1 (bassin Amadeus) contient 11 moles % de H<sub>2</sub> dans un socle igné fracturé directement recouvert de roches sédimentaires.
- Zones avec des dépressions isométriques fermées, qui ne peuvent pas être en elles-mêmes des concentrateurs d'accumulations naturelles d'hydrogène, mais indiquent que le dégazage naturel de l'hydrogène se produit dans cette zone

Connaître l'environnement et le cadre géologique de la zone d'intérêt serait utile pour estimer au préalable son potentiel en hydrogène et élaborer une procédure d'étude RS plus efficace.

