

[Accueil](#) ▶ [Tous les numéros](#) ▶ [Volume 191 \(2020\)](#) ▶ [BSGF - Earth Sci. Bull., 191 \(2020\) 7](#) ▶ [HTML complet](#)

## Accès libre

Problème	BSGF - Earth Sci. Taureau. Volume 191, 2020
Numéro de l'article	7
Nombre de pages)	20
EST CE QUE JE	<a href="https://doi.org/10.1051/bsgf/2020005">https://doi.org/10.1051/bsgf/2020005</a>
Publié en ligne	06 mars 2020

BSGF - Bulletin Sciences de la Terre 2020, 191, 7

## Vaux-en-Bugey (Ain, France): le premier gisement de gaz produit en France, offrant des enseignements sur l'hydrogène naturel en sous-sol?

### Vaux-en-Bugey (Ain, France): le premier gisement de gaz exploité en France, source d'enseignement sur l'hydrogène naturel dans le sous-sol?

Jean-François Deronzier<sup>1\*</sup> et Hélène Giousse<sup>2</sup><sup>1</sup> JFDC, 6, rue de l'Essai, 75005 Paris, France<sup>2</sup> 97, rue Galliéni, 92500 Rueil-Malmaison, France\* Auteur correspondant: [jfderonzier777@gmail.com](mailto:jfderonzier777@gmail.com)

Reçu: 21 novembre 2018 Accepté: 31 janvier 2020

#### Abstrait

L'ancien gisement de Vaux-en-Bugey, première production française de méthane du début du XX<sup>e</sup> siècle, est revisité en tant qu'étude de cas pour aborder les théories actuelles de génération et d'accumulation de gaz comme l'hydrogène et l'hélium. Le volume de gaz initial en place est estimé à 22 millions de m<sup>3</sup>. Sur la base d'une composition de 5% d'hydrogène et 0,096% d'hélium, les volumes de ces gaz sur le terrain étaient respectivement d'environ 1,1 million de m<sup>3</sup> pour l'hydrogène et 24 000 m<sup>3</sup> pour l'hélium. Les différentes hypothèses de sources d'hydrogène sont passées en revue: serpentinisation, hydro-oxydation de la sidérite, radiolyse de l'eau, bio-fermentation, génération mécanique, dégazage à partir de failles en profondeur, corrosion de l'acier. Pour la génération d'hélium, les différentes sources de minéraux radioactifs et les accumulations intermédiaires sont examinées. Le scénario le plus probable est la production d'hydrogène par radiolyse de l'eau et la production d'hélium par désintégration radioactive dans ou à proximité du sous-sol, migrant à travers des failles profondes, stockées et concentrées dans un aquifère avec du méthane thermogénique, puis évacuées par le méthane dans le champ de gaz, lors de la poussée du Jura. Nouvelles mesures avec détecteur de gaz portable, incomplet mais comprenant de l'hydrogène, sur un ancien puits d'exploration avec flux de gaz accessible, donnent l'occasion de commenter l'évolution de la saturation du gaz plus d'un siècle après la découverte de 1906. La diminution de la teneur en hydrogène depuis la découverte du champ est probablement due à l'activité des bactéries sulfato-réductrices.

#### Reprendre

L'ancien gisement méthane de Vaux-en-Bugey, première exploitation française du début du XX<sup>e</sup> siècle, est revisité comme cas d'étude pour confronter les théories actuelles de génération et accumulation de gaz tels que l'hydrogène et l'hélium, présente dans le gisement. Les roches mères de ces composés sont discutées

## Table des matières

## Article

[Abstrait](#)[HTML complet](#)[PDF \(10,03 Mo\)](#)[ePUB \(14,85 Mo\)](#)[Les références](#)[Matériel complémentaire](#)

## Métrique

[Afficher les statistiques de l'article](#)

## Prestations de service

## Mêmes auteurs

[- Google Scholar](#)[- Base de données EDP Sciences](#)[- PubMed](#)[Recommander cet article](#)[Envoyer sur mon Kindle](#)[Télécharger la citation](#)

## Articles Liés

[Géologie et systèmes pétroliers du bassin offshore du Bénin \(Bénin\)](#)

Science et technologie du pétrole et du gaz - Rév. IFP Energies nouvelles, Vol. 68 (2013), n° 2, pp. 363-381

[Distribution spatiale et temporelle de la concentration de H2 sous la surface dans les soi-disant «cercles de fées»: aperçu d'un modèle conceptuel de transport en 2-D](#)

BSGF - Earth Sciences Bulletin 2020, 191, 13

[Prédictions d'intégrité de la géopression et des pièges à partir de données sismiques 3D: étude de cas de la région de la région du delta d'Ughelli Depobelt,](#)

Science et technologie pétrolière et gazière du delta du Niger - Rév. 68 (2013), n° 2, pp. 383-396

Plus

## Bookmarking

[Services aux lecteurs](#)

ainsi que des hypothèses de mise en place et rétention. Le volume initial du gisement est estimé à 22 millions de m<sup>3</sup>. Sur la base d'une composition de 5% d'hydrogène et 0,096% d'hélium, les quantités accumulées dans le gisement pour ces deux gaz sont respectivement 1,1 millions de m<sup>3</sup> pour l'hydrogène et 24 000 m<sup>3</sup> verser l'hélium. Les différentes hypothèses de sources de l'hydrogène sont revues: serpentinsation, hydroxydation de la sidérite, radiolyse de l'eau, bio-fermentation, génération par effet mécanique, dégazage de source profonde viades failles, corrosion de l'acier. Pour la génération d'hélium, les différentes sources de minéraux radioactifs et les accumulations intermédiaires sont également examinées. L'hypothèse la plus probable est la génération de l'hydrogène par radiolyse de l'eau et de l'hélium par radioactivité dans ou proche du socle, migrant par des failles profondes, s'accumulant et se concentrant dans un aquifère avec du méthane thermogénique puis entraînés avec le méthane dans le gisement lors du chevauchement du Jura. De nouvelles mesures gaz sur avertisseur portable, mais comprenant l'hydrogène, sur un des anciens puits forés présentant un flux gaz accessible, permet de commenter une évolution du composé gazeux plus de cent ans après la date de découverte en 1906.

**Mots clés:** champ de gaz / gaz / hydrogène naturel / hélium / Jura / Bugey / Vaux-en-Bugey

**Mots clés:** gisement / gaz / hydrogène naturel / hélium / Jura / Bugey / Vaux-en-Bugey

©J.-F. Deronzier and H. Giouse, Edité par EDP Sciences 2020



Il s'agit d'un article en libre accès distribué sous les termes de la licence d'attribution Creative Commons (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui permet une utilisation, une distribution et une reproduction sans restriction sur tout support, à condition que l'œuvre originale soit correctement citée.

## 1. Introduction

L'hydrogène est un carburant attractif, car il ne produit pas de CO<sub>2</sub> en brûlant. Actuellement la majeure partie de l'hydrogène utilisé dans le monde provient du gaz naturel (par reformatage du méthane) et son intérêt à décarboniser n'est pas évident, sauf si le CO<sub>2</sub> libéré au cours du processus est capté et séquestré.

Depuis quelques années, l'hydrogène a commencé à être produit par électrolyse de l'eau à l'aide d'électricité renouvelable (lorsqu'il n'est pas utilisé dans le réseau). Ce type de production, baptisé Power to Gas, peut contribuer à l'atténuation du réchauffement climatique et pourrait donner l'opportunité de stocker de l'énergie.

Le stockage de l'hydrogène dans des installations de stockage de gaz souterraines existantes ou des installations de stockage dédiées est possible pour les installations de stockage en caverne de sel et actuellement en discussion pour les réservoirs poreux. Des recherches ou des projets pilotes sont lancés pour comprendre comment l'hydrogène se comporte dans le sous-sol (Marcogaz, 2016).

L'apparition d'une concentration anormale d'hydrogène gazeux dans le sous-sol continental est rare et une découverte assez récente. Par exemple, premier rapport en 1984 pour un cas d'étude Kansas-USA, jusqu'à 40% (Angino *et coll.*, 1990) ou en 1987 pour le puits de Bourakebougou au Mali avec une teneur de 97% (Prinzhofer *et coll.*, 2018). Le fait que H<sub>2</sub> n'ait pas été mesuré pour l'analyse de routine dans l'industrie pétrolière «occidentale» est un manque à combler lors de l'analyse comparative de la synthèse de V. Sokolov écrite en 1974. Les mesures de l'hydrogène étaient plus systématiques dans la CEI et elles démontrent que la concentration de l'hydrogène jusqu'à 25% n'est pas si rare dans l'accumulation de gaz naturels. En outre, un ensemble de données montre une saturation en hydrogène jusqu'à 90% pour l'activité volcanique japonaise (Sokolov, 1974).

Des suintements d'hydrogène naturel continental ont été découverts (Larin *et coll.*, 2015; Prinzhofer *et Deville*, 2015; Prinzhofer *et coll.*, 2019) mais nous sommes loin de comprendre les sources d'hydrogène, la migration de l'hydrogène et le comportement de l'hydrogène dans le sous-sol. (Nivin, 2016; Gregory *et coll.*, 2019). L'intérêt pour le sujet a été renouvelé récemment et souffre de la faiblesse des ensembles de données. Une source d'hydrogène naturel, si disponible dans des conditions raisonnables, fournirait une énergie décarbonisée et peut-être renouvelable, si l'origine s'avère partiellement liée à une source de réservoir crustale ou magmatique profonde et prendrait alors une grande part dans la transition énergétique.

C'est la raison pour laquelle toute étude de cas de gisement d'hydrogène naturel est d'un grand intérêt.

Le champ de condensats de gaz de Vaux-en-Bugey, contenant environ 5% d'hydrogène, fait partie de ces études de cas. Par contre, la teneur en hélium était élevée à Vaux-en-Bugey. Cette précieuse production de gaz est également abordée.

- Haut
- Abstrait
- 1. Introduction
- 2 Gaz Vaux-en-Bugey ...
- 3 Gaz de Vaux-en-Bugey contiennent
- 4 Discussion sur l'origine des gaz
- 5 Discussion sur ...
- 8 Conclusion
- Remerciements
- Les références
- Matériel complémentaire
- Liste des tableaux
- Liste des figures

L'objectif de ce travail est de tester les différentes hypothèses de génération et de migration des gaz, focalisées sur l'hydrogène et l'hélium, pour le cas spécifique du champ de Vaux-en-Bugey en cohérence avec le contexte géologique spécifique. L'évolution de la teneur en hydrogène sur le terrain est abordée sur la base de mesures récentes.

La première expérience de la production de gaz en France peut fournir des connaissances clés pour la production et le stockage d'hydrogène naturel.

## 2 Histoire de l'exploration-production du champ gazier de Vaux-en-Bugey et contexte géologique

L'emplacement géographique du champ est présenté à la [figure 1](#) et à la [figure S3](#) pour l'emplacement des puits.



Fig. 1

Carte de localisation du champ gazier de Vaux-en-Bugey.

### 2.1 Histoire de l'exploration-production

Le champ gazier de Vaux-en-Bugey a été découvert en 1906 lors du forage du puits Pagniez-Bregi. Le but de cette exploration était de trouver du sel ou du charbon. Un horizon gazeux a été trouvé à 190,6 et 216 m sous le niveau du sol et une éruption s'est produite. Le puits a été grossièrement bouché et abandonné.

En 1917-1919, le Syndicat d'Études et de Recherches du Bugey forait le puits Torcieu pour le charbon, à 2 km au Nord-Est du puits de découverte.

Après la première guerre mondiale, une société («Société Civile de Recherche de Vaux») a foré un puits de gaz (SCRV) en 1919 mais elle n'a pas fourni un débit de gaz suffisant. Un permis d'exploitation minière (appelé Buisin du nom de la petite rivière traversant la zone) a été accordé au SREP et la production commerciale a commencé en 1924.

Une société («Société de Recherche et d'Exploration Pétrolière», *c'est-à-dire* SREP) a lancé une campagne de forage de 5 puits (SREP1 à SREP5). Tous les puits (à l'exception du SREP1) ont trouvé du gaz mais le principal puits de production du champ était le SREP2. Un éclatement s'est produit pendant le forage, libérant environ 6 millions de m<sup>3</sup> de gaz dans l'atmosphère.

Un gazoduc a été construit pour transporter le gaz vers la ville voisine d'Ambérieu où il était principalement utilisé pour l'éclairage. Cette découverte a suscité de grandes attentes, pour approvisionner Lyon et une verrerie construite dans le quartier. Le raccordement à Lyon n'a jamais été réalisé et l'approvisionnement de la verrerie était temporaire et insuffisant. (Charpy, 1990).

Un procédé (basé sur l'adsorption active du charbon) pour soutirer l'essence (C5+) du gaz fourni autour de 30 l / 1000 m<sup>3</sup> (Locherer, 1927).

Une station dédiée a été construite pour pressuriser le gaz dans des navires mobiles afin de fournir du gaz combustible pour les véhicules (voir [Fig. 1](#)).

La production était très faible après 1950 et a été totalement arrêtée après 1961.

### 2.2 Contexte géologique

Le champ gazier de Vaux-en-Bugey est situé dans la partie sud des montagnes du Jura, à l'extrême marge des Alpes occidentales, à l'est de la France (voir [figures 2 et 3](#)).

À la fin de la formation des nappes dans les Alpes (la phase majeure est le Miocène moyen, environ 15 Ma pb), cette montagne en forme de banane a été comprimée, pliée et poussée vers le Nord-Ouest. Les sédiments mésozoïques (au-dessus du faciès évaporitique du Trias) soumis à des contraintes ont été poussés sur les sédiments oligo-miocènes du graben de Bresse (Pfiffner, 2014). L'âge de la poussée de Vaux-en-Bugey est de 5 My bp, ante Pliocene to ante Plaisancian, de 5.3 à 3.6 My bp (Vincienne, 1932 ; Glangeaud, 1953). L'accumulation de gaz est localisée dans les sédiments poussés.

Les failles de sommeil transversales NW-SE frappent, comme la faille profonde Pont d'Ain-Culoz (Philippe, 1994) a donné la forme générale de la chaîne. Le champ gazier de Vaux est situé le long de celui le plus au sud NW-SE, «faille du Rhône». Cette faille est la frontière entre les montagnes plissées du Jura et le bas tabulaire «Ile Crémieu».



Fig. 2

Carte structurelle régionale (à partir de [Debrand-Passard et coll. \(1984\)](#) et [Philippe \(1995\)](#), modifié).

### 2.2.1 Cadre stratigraphique

La lithostratigraphie synthétique pour la région de Vaux-en-Bugey et Torcieu est présentée à la [figure 4](#).

Le champ étant situé dans une poussée, la lithostratigraphie est incertaine, bien que 7 puits forés, en raison de manques ou de chevauchements de séries. Aucun outil de journalisation n'était disponible à ce moment-là et seuls deux puits obtiennent des noyaux (SREP3 et SREP4).

Au site de Vaux-en-Bugey, l'épaisseur de la croûte continentale est d'environ 30 km, donc entre une fine (24 km) pour le Massif Central-Forez et une épaisse (jusqu'à 58 km) pour le domaine alpin ([Grellet et coll., 1993](#)). Il n'y a aucune preuve magmatique enregistrée dans la région. Le haut du sous-sol s'incline au sud-est de la frontière ouest de la chaîne du Jura vers les Alpes ([Philippe, 1995](#)). La même caractéristique, est connue pour le sous-sol «Ile Crémieu» ([Rocher et coll., 2004](#)).

La partie supérieure du sous-sol, affleurant vers l'ouest dans le Massif Central (surélevé pendant l'orogénie hercynienne et cadomienne) et vers l'est dans le massif de Belledonne (surélevé pendant l'orogénie alpine) et aussi au sud de l'Ile Crémieu à Chamagnieu, foré dans quelques puits est un igneo- standard. type métamorphique. L'âge du sous-sol est encore incertain: si la partie principale est liée à l'orogénie hercynienne (du Dévonien au Permien), reste la possibilité de pièces néo-protérozoïques, liées à l'orogénie cadomienne ([Chiron et Kerrien, 1979](#)). Quoi qu'il en soit, Vaux-en-Bugey est situé à 50 km au sud des nappes cristallines internes et des structures ophiolitiques de l'orogénie hercynienne ([Grellet et al., 1993](#)).

Les sédiments paléozoïques sont présents le long d'une tendance SW-NE ([Debrand-Passard et al., 1984](#)), affleurant vers le sud dans le bassin exploité de Saint-Étienne avec des mesures de charbon stéphanien-autunien et des schistes bitumineux mais explorés uniquement en sous-surface dans le bassin du Bas-Dauphiné ([Mariton, 1981](#)). Ces formations se prolongent vers le nord-est dans le secteur de Vaux-en-Bugey, comme on le voit dans les puits de Torcieu et de Châtillon. La présence de Permo-Carbonifère est attestée dans le puits SREP4 de Vaux-en-Bugey, par carottage. Au puits de Torcieu, la section forée de 1187 m sous le Trias a obtenu 100 m de grès schisteux permien puis schiste noir carbonifère, psammites et feuillages de charbon millimétriques ([Fig. S2](#)).

Les sédiments mésozoïques affleurant en partie dans la zone ont été détaillés dans la synthèse riche et exhaustive du champ, par [Schoeffler \(1941\)](#).

Les grès fluviatiles du Trias inférieur du Buntsandstein, principal réservoir régional, ont une épaisseur de 48 m à Torcieu et absents à Vaux-en-Bugey.

Le Muschelkalk du Trias moyen a une épaisseur de 98 m à Torcieu avec des faciès marneux et dolomitiques ou calcaires.

Le Keuper du Trias supérieur (épaisseur estimée à 150 m), se compose de sections répétitives de marnes irisées, de gypse et de couches dolomitiques provenant d'un environnement lacustre.

Contestant la description de Schoeffler, les auteurs suggèrent que le réservoir de gaz dolomitique de Keuper est un équivalent de la formation de Lettenkhole et se trouve alors à la base de l'unité de Keuper et non à 5 m sous le sommet. Parce que, d'une part, le réservoir de gaz est toujours situé à 100 à 150 m sous le haut Keuper et d'autre part parce que la formation de Lettenkhole est observée régionalement et non l'équivalent supérieur de Keuper «dolomie de Beaumont». Ce dernier disparaît au nord de Vaux ainsi que le faciès évaporitique salé ([Dromart et coll., 1994](#)).

Les formations Liassic et Dogger (350 m d'épaisseur) affleurant en partie dans la vallée de la Vaux, développent des schistes marins et des calcaires avec des schistes gris ferrugineux oolithiques (3,5 m) dans Toarcien, juste en dessous des principaux reliefs calcaires bajociens et bathoniens du site. Ils ont été exploités à Vaux-en-Bugey pour l'extraction du fer.

Les formations du Jurassique supérieur et du Crétacé sont érodées dans la région.

Un oligocène discordant avec des grès marneux verts recouvre le calcaire du Bajocien dans le puits SREP5.

Le miocène, 200 m foré au SREP1, est constitué de sédiments molassiques comprenant du grès, de la marne et du calcaire.

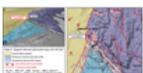


Fig. 3

Carte de localisation du relief et des puits régionaux (MNT, IFP, 2002).

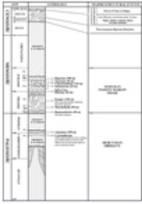


Fig. 4

Lithostratigraphie synthétique pour la région de Vaux-en-Bugey et Torcieu.

### 2.2.2 Formation des pièges, architecture et remplissage de gaz

La formation des pièges à gaz est le résultat d'événements structuraux majeurs successifs ( Fig.3 ):

- Orogenèse hercynienne: après le cadomien, la zone a été profondément touchée et à la fin du Paléozoïque, entre les chaînes de montagnes ont été déposées les mesures de charbon stéphanien-autunien et les schistes bitumineux, qui ont été affectés par les impulsions hercyniennes tardives avec des flux de chaleur crustaux élevés (comme le volcanisme saxon ). Le champ gazier de Vaux-en-Bugey est situé au-dessus de ce SW-NE orienté Bassin Permo-Carbonifère comme le prouvent les puits SREP4 (Vaux-en-Bugey), Torcieu et vers le nord Chatillon. Selon les données gravimétriques, un linéament hercynien suit les bassins permo-carbonifères sous la ceinture de poussée du Jura (Truffert *et coll.* , 1990 ; Philippe, 1995 ), voir la figure 2 ;
- La phase de marge passive mésozoïque avec ouverture de l'océan «Liguro-Piémontais», n'a pas perturbé cette caractéristique;
- La phase d'extension oligocène a créé le Graben profond de Bresse avec un soulèvement de 2 km du sous-sol à la frontière Est, face au Jura, comme le suggère le profil d'Ecors ( Fig. 5 ). À l'échelle régionale, il y avait une réactivation possible d'anciennes caractéristiques hercyniennes. A titre illustratif, les failles bordant la Bresse Graben ont la même direction que les failles bordant le Bassin Permo-Carbonifère Bas-Dauphiné ( Fig. S1 coupe a);
- Orogénie alpine: celle-ci tardive a eu une phase paroxystique au milieu du Miocène, autour de 15 My bp. En ce qui concerne le Jura, il est désormais admis (Bergerat *et coll.* , 1990 ;Guellec *et coll.* , 1990 ; Truffert *et coll.* , 1990 ; Philippe, 1995 ;Madritsch *et coll.* , 2011 ;De La Taille, 2015 ) depuis l'interprétation du profil sismique profond des Ecors, qu'une phase d'inversion du socle au cours du Miocène final est à l'origine du pieu sédimentaire poussant mésozoïque survenu après le Miocène. Cette inversion miocène est illustrée sur la figure 5 , le long du profil Ecors;
- De nos jours, la convergence entre les plaques adriatique et européenne est toujours en cours et une sismicité importante est enregistrée dans la région ( De La Taille, 2015 ). Le séisme d'Ambérieu (Chautagne) en 1822 (intensité 7,5 MSK), ( Fig.6 ), ou le plus récent en 2006 (magnitude 3,7) à Conand (Bureau Central Sismologique Français, 2006 ), ( Fig. 7 ), sont des événements significatifs. Jouanne *et coll.* (1995) déterminent un taux horizontal de 4 mm / an pour le déplacement actuel.

Dans ce contexte, le champ gazier de Vaux-en-Bugey présente une localisation et une situation structurelle très spécifiques.

Le champ est situé à l'intersection de deux tendances principales de failles affectant le sous-sol (voir les figures 2 et 3 ). Le gradient géothermique, tel que tracé par le BRGM (BRGM, 2008 ), est élevée dans la zone de jonction de ces deux grandes tendances structurelles, jusqu'à 45 ° C / km ( Fig. 8 ).

- le premier est direction NE-SO, en bordure du Bassin du Bas-Dauphiné le long de l'île Crémieu, réactivé pendant l'extension oligocène à partir d'anciennes caractéristiques hercyniennes;
- la deuxième direction principale de la faille est NW-SE, le long du Rhône. Il semble être conjugué au premier. La ligne sismique 88 Mex 03 en traversant cette direction montre la création d'un creux étroit pendant l'Oligo-Miocène ( Rocher *et al.* , 2004 ) ( Fig. S1 coupe b). A l'heure actuelle et peut-être depuis le Miocène moyen (15 Ma pb, principale phase de compression dans les Alpes), une faille décrochée se produit le long de la faille du Rhône entre le Jura et l'unité monoclonale «l'île Crémieu» ( Philippe, 1995 ) ( Fig. 3 ). En surface, la faille de Villebois présente un déport de 300 m (Kerrien et Monjuvent, 1990 ).

Cet emplacement à l'intersection des principaux accidents structuraux est propice au dégazage profond des gaz.

Le champ est également situé au-dessus d'un sommet du réservoir fluviatile Buntsandstein du Trias inférieur, à l'échelle régionale. Ce sommet est exactement situé au-dessus de l'ancien bassin hercynien SW-NE restant. Cette géométrie est favorable à un bon piégeage des gaz, du moins depuis l'Oligocène, lorsque le graben de Bresse a été créé et que le sous-sol jurassien a été relevé.

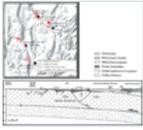


Fig. 5

Données sismiques récentes ( De La Taille C., 2015 ). Coupe transversale du profil Ecors ( Philippe Y., 1995 ) - voir emplacement Figure 2 .



Fig. 6

Événement sismique de Chautagne (1822). Intensité MSK VII-VIII, magnitude (5,5-6). Source BCSF.

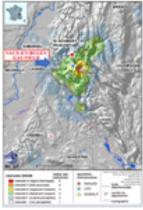


Fig. 7

Événement sismique de Conand (2006). Magnitude (3,7), profondeur de l'épicentre = 1-2 km. Source BCSF.

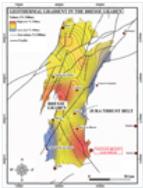


Fig. 8

Gradient géothermique dans le bassin de la Bresse ( BRGM, 2008 ).

### 2.2.2.1 Un champ dans une rampe poussée

La coupe transversale, présentée à la [figure 9](#) , orientée N45, de Torcieu-SREP4 (Vaux-en-Bugey) et SREP5, à la ville de Lagnieu, présente une interprétation actualisée qui tente de mieux illustrer la position et la relation de la poussée mésozoïque sur le Paléozoïque et sous-sol. Le précédent est disponible auprès de [Schoeffler \(1941\)](#) ( [Fig. 10](#) ).

Le champ de Vaux-en-Bugey est inclus dans une rampe poussée recouvrant les anciennes couches permocarbonifères. Un mélange de sédiments mésozoïques fracturés a poussé la molasse oligo-miocène vers le sud-ouest. Cette interprétation est cohérente avec les caractéristiques structurelles décrites ci-dessus: Faille du Rhône N130, qui coupe fortement toute la série mésozoïque, juste au sud du champ. Le schéma est différent sur le domaine Est de Vaux-en-Bugey (St Sorlin, Villebois), où les rampes chevauchent la série Jurassique moyen devant «l'île Crémieu» ( [Schoeffler, 1941](#) ). À l'ouest, des rampes chevauchent la molasse du Miocène ( [Philippe, 1995](#) ).

Trois plans de glissement différents sont représentés:

- celui basal est plongeant SW et illustre ainsi une possible inversion du temps post-pliocène à présent, comme suggéré par des auteurs comme [Glangeaud \(1953\)](#) , [Jouanne \(1994\)](#) ou [De La Taille \(2015\)](#) . Le soulagement de Gros-Foug est constamment augmenté. [Jouanne et coll. \(1994\)](#) , estiment un taux de déplacement latéral de 4 mm / an pour le sous-sol, impliquant une poussée qui sous-tend le Jura. Cette caractéristique est cohérente avec les données des puits Torcieu et SREP4: les Muschelkalk (98 m d'épaisseur) et Buntsandstein (48 m d'épaisseur) forés à Torcieu sont absents du SREP4. Ainsi, l'avancement devrait être toujours actif;
- le décollement situé au-dessus de Muschelkalk schisteux, à la base des faciès évaporitique et lagunaire de Keuper (Gypse, schiste et dolomite) génère un deuxième plan de glissement, base d'une unité comprenant des pièces liassiques forées à 80 m de long dans le puits SREP4, 10 m SREP5 et 0,4 m dans le puits Torcieu avec oolithes ferrugineux oolithiques;
- un troisième plan de glissement, flanquant les pièces de Liassic, représente la base d'une unité de Keuper comprenant des morceaux retirés de réservoir de Lettenkhole dolomitique près de la base. Il délimite avec une seconde section épaisse décimétrique liassique, fortement perturbée par les frottements et capable d'établir un drain vertical et transversal vers le réservoir ascendant. Cette caractéristique est interprétée ici comme faisant partie d'un flanc anticlinal inversé, comme observé par forage dans les puits S1, 2 et 3 (Keuper en surface, puis Lias et Dogger à TD) à 4 km au sud-est du champ ( [Schoeffler, 1941](#) ).

Le calcaire Dogger devant la poussée (à TD pour le puits SREP5), au-dessus du plan de glissement basal, est censé faire partie de la brèche avant (zone fracturée située sous la poussée), reste de l'anticlinal renversé.

La forme de la structure du sommet du champ, basée sur les premières profondeurs d'occurrence de gaz sur les différents puits du champ (voir [Tab.1](#) ) ressemble à un anticlinal avec un sommet non loin du SREP3 et une fermeture possible jusqu'à 60 m. Mais la fermeture effective est de 10 à 15 m pour le calcaire de base sinémurien («calcaire à Gryphées») 120 m au-dessus du réservoir.

Le puits SREP1, est situé dans un autre compartiment abaissé et n'a pas trouvé de gaz.

Le réservoir de gaz correspond au calcaire dolomitique de Keuper (une ou deux couches) de quelques mètres et même moins. Ces horizons sont intercalés de marnes ou de schistes et de gypse. Cette situation peut conduire à une surpression des réservoirs. C'est le cas du SREP2 à 222 m sous le sol et peut-être du puits Pagniez-Bregi. (voir après).

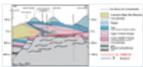


Fig. 9

Coupe transversale interprétative schématique.

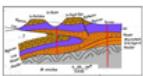


Fig. 10

Coupe transversale interprétative schématique ( [Schoeffler, 1941](#) ).

**Tableau 1** Table des marqueurs de Vaux-en-Bugey.

#### 2.2.2.2 Remplissage de gaz

Les gaz ont probablement été piégés dans un mécanisme en deux étapes ( [Fig. 11](#) ).

La zone initiale de piégeage de gaz (piège 1) doit être située le long de la marge du bassin de la Bresse ou vers le nord, à partir du bassin permio-carbonifère ou de failles profondes. Depuis le soulèvement post-oligocène, le réservoir Trias Buntsandstein voisin (48 m d'épaisseur au puits Torcieu) dans des blocs inclinés à failles préservés, pourrait être chargé.

Au cours de l'inversion du socle du Miocène tardif ou de la poussée post-pliocène jusqu'à présent, les failles sont réactivées et une migration secondaire vers la formation dolomitique de Keuper était possible (piège 2).

Définir quand cette dernière migration a eu lieu, précédente ou post poussée, est discutable et sera revisité au chapitre 3.2 avec les données de pression issues de la production sur le terrain. Néanmoins, l'architecture décrite de la poussée, fracturée, avec des voies de migration possibles verticalement et latéralement, ainsi que des spectacles de pétrole et de gaz à l'intérieur de la base du décollement ( [Fig. 9](#) ) plaident en faveur d'un remplissage récent.

Un scénario alternatif est de considérer que l'accumulation de gaz est le reste d'un dégazage plus ancien ayant lieu à environ 10 km au nord-est.



Fig. 11

Processus de charge schématiques (champ gazier de Vaux-en-Bugey).

### 3 Gaz de Vaux-en-Bugey contiennent

#### 3.1 Volume produit

Le SREP3 est au sommet de la zone gazeuse mais la faible épaisseur du réservoir (0-10 m) dans ce puits, pourrait expliquer le fait que la production de gaz de ce puits était très faible.

Même avec une certaine incertitude, les auteurs donnent des informations sur l'épuisement du champ ( [Schoeffler, 1941](#) ; [Bonte, 1948](#) ; [Charpy, 1990](#) ). Les principales incertitudes sont le volume de gaz libéré lors de l'éruption du puits de découverte (Pagniez-Bregi) et la production au cours de la dernière période (1956–1961). La [figure 12](#) présente un historique de production reconstitué, basé sur l'hypothèse d'un rejet de gaz de 2,6 millions de m<sup>3</sup> (10 jours d'éruption) et d'une production nulle entre 1956 et 1961. L'éruption sur SREP2 est estimée à 6 millions de m<sup>3</sup> par [Bonte \(1948\)](#) .

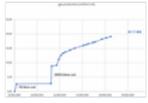


Fig. 12

Historique de production du champ gazier de Vaux-en-Bugey.

### 3.2 Épuisement de la pression

Les valeurs de pression sont encore plus incertaines que les volumes. Ils sont mesurés en  $\text{kgf} / \text{cm}^2$  en tête de puits lors de la production et les dates correspondant aux différentes mesures ne sont pas précises. Certaines valeurs correspondent au puits SREP2 et d'autres au puits SREP5 ou SREP3 (utilisé pour mesurer la pression). Certaines valeurs correspondent à la pression dans la couche supérieure (SREP5) ou à la plus profonde ou à une moyenne des deux valeurs.

Compte tenu du faible niveau de pression, le facteur  $z$  est proche de 1. C'est la raison pour laquelle la figure 13 est un diagramme croisé  $P / \text{volume}$ .

Deux valeurs sont particulièrement intéressantes:

- la pression sur SREP2 avant et après l'éruption ( soit une production de 6 millions de  $\text{m}^3$  ). Le site de gaz a commencé à 221 m avec un puits rempli d'eau ( Schoeffler, 1941 ) Cela signifie que la pression du réservoir était de 22 bars ou plus. Nous choisissons cette valeur minimale pour rapporter sur le graphique;
- la valeur de  $15 \text{ kgf} / \text{cm}^2$  est donnée après stabilisation et montée en pression ( Schoeffler, 1941 ).

Ce diagramme croisé suggère trois résultats importants:

- Premièrement, en raison de toutes les incertitudes, la courbe n'est pas un vrai droit mais une tendance linéaire claire pourrait être tracée. Cela signifie qu'il n'y a pas d'effet d'entraînement de l'eau, qu'aucun support de pression n'est fourni par un aquifère. Elle est conforme à la description du réservoir: lits dolomitiques dispersés avec vacuoles bouchées par des marnes et du gypse. Une mesure de pression sur SREP5 en 2018, réalisée par les auteurs, a donné une valeur de 1 bar (absolu) en tête de puits. Cette très faible valeur, près de 6 décennies après la fin de la production, si elle est représentative, confirmerait que le réservoir est isolé;
- d'autre part, pour s'adapter à la tendance, en particulier les deux mesures de pression avant et après l'éclatement du SREP2, la pression de découverte (que nous ne connaissons pas) devrait être d'environ 10 bars au-dessus de la pression hydrostatique. Ceci est cohérent avec un réservoir isolé et surélevé et pourrait expliquer la violence des deux éruptions. La pression initiale estimée, 10 bars au-dessus de l'hydrostatique, pourrait s'expliquer par un soulèvement structurel de 100 m pendant le transport de poussée;
- troisièmement, le volume total de gaz initialement en place est d'environ 22 millions de  $\text{m}^3$  (le point de croisement approximatif entre la droite d'épuisement et l'axe du gaz produit) et le facteur de valorisation est très élevé: environ  $20,73$  (millions de  $\text{m}^3$  de production de gaz) /  $22$  (millions de  $\text{m}^3$  de gaz initialement en place) = 94%.



Fig. 13

Cross-plot pression / production pour le champ gazier de Vaux-en-Bugey.

### 3.3 Qualité du gaz

La qualité du gaz a été mesurée plusieurs fois sur le puits Pagniez Bregi et sur le puits de production SREP2 (Bregi, 1909 ; Schoeffler, 1941 ). Le tableau 2 présente ces données et données récentes qui seront discutées ci-après.

Ces analyses montrent les teneurs en alcanes ( $\text{C}_1$  à  $\text{C}_4$  : environ 90%), en azote ( $\text{N}_2$  : environ 5%), en dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$  : 0,5 à 5%), en hydrogène ( $\text{H}_2$  : 3,5 à 5 %) et les gaz rares, en particulier l'hélium avec une teneur de 0,096% (Lepape, 1958 ).

L'analyse mentionnée par Locherer (1927) est différente: elle mentionne une teneur nulle en hydrogène, ce qui n'est pas cohérent avec l'analyse de Pagniez Bregi (1909) et celle de Schoeffler (1941) .

Pour essayer de vérifier  $H_2$  contenu, un calcul sur la valeur calorifique a été fait. Un pouvoir calorifique global de  $9500 \text{ kCal} / \text{m}^3$  est évoqué par [Locherer \(1927\)](#). Cette valeur semble globalement cohérente soit avec l'analyse de Locherer sans essence  $C_5+$ , soit avec l'analyse de Schoeffler prenant en compte le pouvoir calorifique  $C_5+$ . Cette approche ne permet pas de conclure clairement.

Néanmoins, les auteurs ne font pas beaucoup confiance aux données de Locherer, car elles sont différentes des deux autres et parce que Locherer ne mentionne pas l'origine de ses données.

Sur la base d'un volume total de gaz initialement à la place de 22 millions de  $\text{m}^3$  et d'une teneur initiale d'environ 5% d'hydrogène, le champ gazier de Vaux-en-Bugey contenait 1,1 million de  $\text{m}^3$  d'hydrogène.

Aucune valeur de teneur en  $H_2S$  n'est disponible pendant la période de production historique, mais il a été signalé que le gaz sentait fortement pendant la période de production, ce qui suggère une teneur importante en  $H_2S$  ([Bonte, 1948](#)). De plus, du soufre trouvé dans les fissures des noyaux des réservoirs a été remarqué ([Schoeffler, 1941](#)). Ce soufre a probablement cristallisé à partir de  $H_2S$  au contact de l'oxygène, l'oxygène étant fourni par la boue ou l'air lors du carottage et du forage.

---

**Tableau 2** Données sur la qualité du gaz de Vaux-en-Bugey.

---

## 4 Discussion sur l'origine des gaz

Un processus de charge schématique est présenté à la [figure 11](#) pour l'accumulation de gaz. L'origine des différents gaz du domaine de Vaux-en-Bugey est à discuter car les différents composants n'ont pas forcément la même origine. Un accent particulier est mis sur l'hydrogène et l'hélium.

### 4.1 Méthane et alcanes

Il existe encore un débat concernant l'origine des gaz d'hydrocarbures naturels comme le méthane et les gaz légers jusqu'au pentane ([Etiopie et Schoell, 2014](#)). La plupart du temps, la génération de ces gaz pourrait s'expliquer par l'évolution microbienne ou thermique de la matière organique concentrée dans les roches sédimentaires. Ce procédé, nommé biotique semble bien adapté au champ gazier de Vaux-en-Bugey.

Les roches sources carbonifères et permienes sont présentes au sud dans le bassin du Bas-Dauphiné et également au nord. Dans le puits Charmont (NE de Vaux), les charbons carbonifères ont une épaisseur de 52 m et pour le puits Chatelblanc, la modélisation de la maturité suggère l'apparition de la génération de gaz au début du Crétacé pour la source autunienne ([Pullan et Berry, 2019](#)).

A l'heure actuelle, le Tmax enregistré (la fourchette est 435–470 dans la fenêtre pétrolière) dans le Bassin du Bas-Dauphiné et la modélisation du bassin pour les charbons stéphaniens, à plus de 1000 m de profondeur ([Guellec et al., 1990](#)), expliquent aisément une génération de méthane. La qualité de ces sources est élevée avec un potentiel pétrolier de 20 à 180 kgHC / t pour les charbons stéphaniens, 5 à 500 kgHC / t pour les schistes bitumineux stéphaniens et 5 à 120 kgHC / t pour les schistes bitumineux autuniens. Dans le puits Chassieu, représentatif du bassin, l'épaisseur totale des roches mères est d'environ 30 m ([Blanc et coll., 1991](#)). Le méthane provient probablement du charbon stéphanien plus profondément enfoui et les hydrocarbures légers des schistes permien (autuniens). La première génération de pétrole et de méthane à partir de schistes bitumineux permien-autuniens et de mesures de charbon stéphanien et de schistes bitumineux a commencé au moins à la fin du Crétacé ([Blanc et al., 1991](#)). Après la phase de pré-rift de l'Oligocène, une partie des roches mères enfouies plus profondément est devenue plus mature dans le bassin de la Bresse et également dans la chaîne jurassienne, le soulèvement des charbons pendant la phase alpine du Miocène pourrait produire du méthane par décompression.

Il faut mentionner que l'occurrence de la formation de schiste chaud autunienne est éloignée de l'emplacement de Vaux (60 km). Cette formation s'incline vers le nord-est, affleure à Givors, et atteint 1000 m de profondeur à St Priest (20 km à l'est de Givors) selon [Mariton \(1981\)](#) et [Gudéfin \(1980\)](#). Cet horizon est inconnu au nord du bassin, uniquement mentionné dans le puits Blyes 101 (–975 m / sl pour le haut Permo-Carbonifère) et absent dans le puits Cormoz (Est d'Ambérieu). Cette formation paléozoïque a une profondeur de 500 m dans les puits de Vaux SREP4 et Torcieu mais sans les schistes chauds et faciès houillers comme dans le puits de Torcieu (1157 m forés section paléozoïque pour le puits de Torcieu. Voir [Tab. 1](#)).

Des preuves de système de méthane thermogénique pourraient être validées pour le puits Blyes 101, avec une exposition de gaz (composition non disponible) lors du forage, dans le réservoir de Buntsandstein: ce puits est situé à la limite sud-est du bassin du Bas-Dauphiné (voir [Figs.2](#) et [3](#)).

Une origine biogénique du méthane n'est pas pertinente pour l'étude de cas de Vaux-en-Bugey, car la composition du gaz montre une concentration en alcanes supérieurs jusqu'à 8% (voir [Tab. 2](#)). Les accumulations biogéniques évaluées obtiennent du CH<sub>4</sub> presque pur.

Il faut mentionner que le CH<sub>4</sub> pourrait être produit par des bactéries ou par réaction chimique (réaction de Sabatier) à partir de CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>. Ce mécanisme est discuté en 4.2 et évalué comme peu probable pendant la phase d'épuisement du champ.

En conclusion: la thermogenèse des alcanes devrait être efficace pour le terrain.

## 4.2 Dioxyde de carbone

Le CO<sub>2</sub> dans le sous-sol pourrait avoir des origines différentes ([Jeandel, 2008](#)).

Certains d'entre eux sont inorganiques:

- dégazage du manteau ou du magma comme dans le champ de CO<sub>2</sub> de Montmirail (Drôme, France) ([Jeandel, 2008](#); [Crossey et coll., 2009](#));
- métamorphisme des carbonates;
- dissolution des carbonates.

Certains autres processus sont organiques: maturation du kérogène, métamorphisme du charbon, biodégradation du pétrole et du gaz.

La saturation en dioxyde de carbone est d'environ 5% dans le gaz de Vaux. Dans le contexte de Vaux-en-Bugey, la présence de CO<sub>2</sub> pourrait s'expliquer soit par le processus de maturation organique, soit par l'origine mantellique et la migration à travers des failles profondes.

## 4.3 Azote

L'azote dans le sous-sol pourrait avoir différentes origines:

- origine atmosphérique par l'eau souterraine;
- maturation des matières organiques, en particulier le charbon, les atomes d'azote étant fournis par des molécules organiques sous forme d'acides aminés. Ce gaz est généré à une température plus élevée que le méthane ([Littke et coll., 1995](#));
- dégazage du manteau ou du magma ([Ballentine et Lollar, 2002](#)).

L'origine atmosphérique n'est pas possible pour Vaux-en-Bugey car son réservoir est hermétiquement fermé sans écoulement d'eau. Les deux autres hypothèses sont réalistes.

## 4.4 Hélium

Cet élément si rare (5,23 ppm dans l'air - 960 ppm dans le gaz de Vaux-en-Bugey), semble particulièrement bien représenté dans le Jura. Non seulement dans le champ de gaz de Vaux (0,096% volume) mais aussi dans le puits de gaz de Grozon situé vers le nord (dans la région de Lons-le-Saulnier) avec jusqu'à 1,34% volume ([Ricour, 1956](#)). À titre de comparaison, rappelons que dans le grand champ d'hélium de Panhandle (US-Texas), la teneur varie à l'intérieur du champ, de 1,3 à 0,1% ([Gage et Driskill, 2003](#)).

L'hélium étant généré à partir de la désintégration radioactive de l'uranium, du thorium et du potassium dans les grains minéraux, les candidats comme source sont d'anciennes formations permettant un long processus radioactif.

Les schistes chauds du Permien (270 My pb), précédemment cités, forés dans le Bassin du Bas Dauphiné, à l'Est de Lyon sont un bon candidat. Une soixantaine de puits ont été forés dans la zone: ils délimitent un bassin orienté SW-NE avec une formation de coaly stéhanienne moyenne à la base et juste au-dessus d'une formation de schiste bitumineux autunien. L'épaisseur du lit de schiste bitumineux pourrait atteindre 10 m et l'épaisseur totale de la formation est supérieure à 200 m par endroits.

Comme l'hélium se dissout de préférence dans le gaz plutôt que dans l'eau ([Brown, 2010](#); [Byrne et coll., 2018](#)), l'hélium est d'abord transféré des grains solides dans l'eau interstitielle, puis chassé par migration de méthane gazeux. La formation autunienne est conforme à ce schéma: il y a des lits de grès blanc grossier («gore») à la base de la formation et entre les lits de schiste bitumineux. De plus, comme les eaux anciennes et stagnantes collectent plus d'hélium que les eaux jeunes, hydrodynamiques, le bassin du «Bas Dauphiné», presque entièrement enseveli, peut être pertinent.

L'hélium peut également provenir du sous-sol contenant des minéraux radioactifs et migrant par failles. Cette origine est réaliste selon la situation structurale de Vaux, décrite ci-dessus: couverture sédimentaire limitée (environ 1500 m) et failles profondes pour permettre la migration.

L'hélium, s'il est produit par la désintégration radioactive de très vieux minéraux, qu'il s'agisse du sous-sol ou des schistes chauds, a d'abord été stocké dans l'eau souterraine puis rincé par la phase de gaz naturel.

## 4.5 Hydrogène

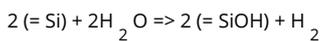
### 4.5.1 Différents mécanismes de $H_2$ théoriquement disponibles

Les théories actuelles pour la génération  $H_2$  dans le sous-sol sont encore balbutiantes.

Les processus suivants ont été identifiés ou prouvés *in situ* :

- serpentinisation de l'ophiolite ( hydro-oxydation  $Fe^{2+}$  de l'olivine) (Deville *et coll.*, 2010 ;Malvoisin, 2013 ; Etiope et Schoell, 2014 );
- radiolyse de l'eau due à la présence de minéraux radioactifs (Lin *et coll.*, 2005 );
- réaction de l'eau avec  $^{40}Ca$  (produit par désintégration radioactive de  $^{40}K$ ) ( Gregory *et al.*, 2019 );
- génération mécano-radicalaire ou cataclase due à des failles (Hirose *et coll.*, 2011 ).

Des études expérimentales soutiennent que le mécanisme de frottement libre  $H_2$  d'une gamme de roches silicatées et non silicatées, associé à l'eau, et même au basalte sec (en utilisant de l'eau cristallographique);



De nombreuses études sur le terrain donnent une association claire entre l'activité sismique et les flux élevés d'hydrogène (également radon et  $CO_2$ ). Au Japon, Sugisaki *et coll.* (1983) enregistre des concentrations allant jusqu'à 5000 ppm (0,5%) dans les rainures de faille du district de Nagoya. Pour les tremblements de terre historiques, il trace plusieurs milliers de ppm (plusieurs pour cent en volume) pour toutes les failles historiquement actives liées au tremblement de terre. Des valeurs inférieures (<200 ppm) sont enregistrées dans les défauts où le séisme associé est inconnu, classés comme «défaut actif préhistorique». En Chine, Wang *et coll.* (2018), précisent que la Chine a commencé à observer l'hydrogène dissous dans les années 1970: Un projet scientifique d'exploration de forage profond a montré une valeur élevée de la concentration d'hydrogène plusieurs jours avant le séisme, à une très longue distance jusqu'à 680 km de l'épicentre:

- production d'hydrogène de micro-organismes dans des conditions aérobies et anoxiques. Pour les conditions anoxiques, les processus suivants sont possibles: fermentation de matière organique, fixation de l'azote, oxydation du monoxyde de carbone, oxydation du phosphore, oxydation de l'acétate ( Gregory *et al.*, 2019 ).

D'autres mécanismes semblent réalistes ou possibles mais pas clairement observés ou démontrés pour le sous-sol (quelques centaines de mètres de profondeur):

- dégazage de l'hydrogène primordial (Larin, 1993 );
- hydro-oxydation du  $Fe^{2+}$  de la sidérite à température modérée Milesi *et coll.* (2015) démontrent que la réaction est possible mais à haute température et haute pression;
- hydro-oxydation de la pyrite. Ce minéral est très stable et aucune hydro-oxydation (sans oxygène) n'a été signalée (Toniazzo, 1998 );
- hydro-oxydation de  $Fe^{2+}$  dans la biotite. Cette réaction est actuellement étudiée par J. Murray, B. Fritz *et al.* avec des données réelles du granit de Souz-sous-Forêts. Il est possible mais ne produira des quantités importantes d'hydrogène que si l'hydrogène est régulièrement soutiré du système;
- réaction de  $H_2S$  avec FeS (pyrrhotite) conduisant à la formation de pyrite et  $H_2$  libéré (Drobner *et coll.*, 1990 );
- La génération d'  $H_2$  par thermogenèse à partir de matière organique n'est pas prise en compte, sur la base de la production de gaz de schiste. L'hydrogène n'est pratiquement jamais enregistré. La meilleure valeur est de 0,07% dans le schiste de Barnett (Johnson *et coll.*, 2015 ).

D'autres mécanismes ont été observés dans des contextes industriels mais ils semblent irréalistes *in situ en* raison des éléments ou du niveau d'énergie dont ils ont besoin:

- fabrication de gaz à partir de charbon ou de bois;
- hydro-oxydation du fer métal (Fe) à haute température (réaction chimique qui conduit à découvrir du gaz H<sub>2</sub> par Lavoisier);
- génération de H<sub>2</sub> lorsqu'un outil en fer agit dans l'eau, nécessitant une énergie élevée (lors du forage ou du broyage de roches) (Bjornstad *et coll.*, 1994);
- réaction d'acide (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> par exemple) sur la poudre de fer (procédé utilisé pour préparer H<sub>2</sub> pour les ballons dirigeables au début du XXe siècle (Bidault des Chaumes, 1914) ou conduisant à la corrosion des équipements en acier;
- pyrolyse du méthane (CH<sub>4</sub> >> C + 2 H<sub>2</sub>). Cette réaction a été récemment améliorée par catalyse et proposée comme procédé de fabrication d'hydrogène à 600 ° C (Upham *et coll.*, 2017);
- la pyrolyse des schistes bitumineux (comme les schistes bitumineux du Colorado) à 510 ° C donne un meilleur taux de génération d'hydrogène que de méthane (Burnham, 2010);
- plus de H<sub>2</sub> peut être généré par la corrosion à l'oxygène des équipements en acier (contenant du Fe) ou des effets similaires dus à la protection cathodique (corrosion de l'anode ou génération de H<sub>2</sub> en cas de potentiel trop élevé appliqué à l'équipement).

#### 4.5.2 Mécanismes possibles pour la génération de Vaux H<sub>2</sub>

L'origine de l'hydrogène du champ de Vaux-en-Bugey n'est pas claire. Les données isotopiques devraient aider à confirmer certaines hypothèses mais elles ne sont pas disponibles. Sur la base des connaissances géologiques d'une des régions les plus étudiées de France, le Jura, plusieurs hypothèses sont proposées parmi la liste présentée ci-dessus:

- l'hydro-oxydation du Fe<sup>2+</sup> des minéraux a été la première interprétation provisoire. Aucune roche ultrabasique (avec des concentrations de fer divalent Fe<sup>2+</sup>) qui pourrait produire de l'hydrogène dans la croûte n'est signalée autour de l'emplacement de Vaux. Le sous-sol est un sous-sol de type ignéo-métamorphique standard. Les études de cas du Texas et du Mali ont des roches précambriennes à proximité, pas dans la région de Vaux-en-Bugey;
- des mines de fer ont été exploitées à proximité (Mazenot, 1936), à Villebois par exemple, et le faciès toarcien oolithique ferrugineux est confirmé dans le puits Torcieu (20 m au-dessus du plan de décollement). Mais les données disponibles sur cet horizon ferreux liasique, (Cayeux, 1922) ne montrent que des composants Fe<sup>3+</sup> sous forme d'hématite. Dans d'autres mines de fer du même horizon, la sidérite de l'Ouest (province du Mont Du Lyonnais) ou du Sud (province de l'Isère) (FeCO<sub>3</sub>) est signalée (Cayeux, 1922) comme composant du ciment entre les oolites. Ainsi, il n'est pas totalement impossible que la sidérite existe dans l'horizon ferreux toarcien et ait été oxydée pour fournir du H<sub>2</sub> au champ de Vaux mais ce n'est pas très probable;
- comme la position et la composition du granite dans le sous-sol sont inconnues dans la région, le processus d'hydro-oxydation de la biotite reste possible le long des failles profondes du sous-sol mais n'est pas documenté;
- le dégazage de la croûte profonde de H<sub>2</sub> le long des failles est un mécanisme possible que des défauts profonds assurent la communication entre la croûte profonde et Vaux formation. La migration de l'hydrogène à partir de la croûte profonde pourrait avoir commencé très tôt le long d'anciennes failles hercyniennes réactivées par la distension oligocène ou l'inversion alpine à la fin du Miocène et éventuellement en cours;
- le processus radiolytique (dû à la désintégration radioactive) est possible. Il serait probablement lié à la formation d'hélium et à la migration à partir de la croûte profonde mentionnée ci-dessus. Lin *et coll.* (2005) ont proposé un diagramme croisé entre la teneur en He et la teneur en H<sub>2</sub> dans l'eau souterraine. Une ligne est tracée pour une génération radiolytique pure et différents spots représentant différents contextes géologiques où l'hélium et H<sub>2</sub> ont été mesurés.

Calcul d'une teneur en eau H<sub>2</sub> et He à partir de la teneur en gaz (5 et 0,096%), de la pression du champ

(30 b) et des constantes d'Henry respectives ( $5,10^7$  et  $10^8$ ), le point correspondant à l'eau de formation de Vaux ( $H_2 = 8,10^6 \mu\text{mol} / \text{L}$  et  $He = 3,2 \cdot 10^5 \mu\text{mol} / \text{L}$ ) se situe parfaitement dans le coin haut de la parcelle, non loin de la tendance de production radiolytique / radiogène. Ce fait est cohérent avec une génération radiolytique d'hydrogène et une génération radiogène d'hélium à partir de la même source.

- la réaction de l'eau avec  $^{40}\text{Ca}$  doit être envisagée. Cet effet est probablement à l'origine de l'hydrogène contenu dans les gisements de gaz d'Allemagne du Nord en raison du sel de Zechstein ( [Gregory et al. , 2019](#) ) mais n'est pas probable pour Vaux-en-Bugey car le Keuper ne contient pas de minéral apparemment potassique (comme la sylvinite);
- la production d'hydrogène fermentaire anaérobie dans le réservoir est peu probable: étant donné que le contenu organique du réservoir de dolomite est supposé être pauvre, une génération biogénique de méthane est exclue (voir [section 3.1](#) );
- l'effet de corrosion de l'acier ne peut expliquer  $H_2$  mesuré au début de l'exploitation ou lors de la découverte du champ (pas d'oxygène dans le sous-sol, tubages et tubes neufs, pas de protection cathodique);
- le dernier mécanisme à considérer est le mécanisme de frottement. De nombreux détails sur l'histoire tectonique quaternaire sont rapportés par [De La Taille \(2015\)](#) pour souligner l'activité de failles dans cette ceinture de poussée active ( [Fig.5](#) ); comme l'événement sismique de Chautagne (Ambérieu) (1822), MSK intensité VII - VIII, magnitude (5,5) ( [Fig.6](#) ). En outre, une sismicité très superficielle a été enregistrée dans le sud du Jura, comme dans le séisme Conand (près de Vaux-en-Bugey, 3,7 magnitude mais épïcêtre entre 1 et 2 km de profondeur) ( [fig. 7](#) ), et ainsi affecter les sédiments des chevauchements par . Il semble maintenant établi que des poussées crustales ont également lieu dans la chaîne: les intensités les plus élevées associées sont prévues jusqu'à 6,7. Pour [Jouanne et al. \(1995\)](#), le mouvement induit des roches devant le Jura est estimé à 4 mm / an. Selon [Hirose et al. \(2011\)](#) , la concentration d'hydrogène pourrait atteindre 1,1 mol / kg de fluide. En considérant une surface de 1 km<sup>2</sup> (taille approximative du compartiment de champ) et une épaisseur de 1 mm, le nombre de moles de  $H_2$  qui pourraient être générées pourrait être de  $1,1 \cdot 10^6$  à comparer à  $3,10^4$  moles de  $H_2$  présent Sur le terrain. Ce calcul approximatif démontre que ce mécanisme semble capable d'expliquer la génération  $H_2$  à Vaux.

Selon un tel mécanisme, une source très jeune de  $H_2$  est peut-être en cours. Il est difficile de prouver que ce processus fonctionne encore à l'heure actuelle, car la qualité du gaz de gisement a changé au cours des dernières décennies, probablement en raison de processus secondaires décrits dans le chapitre suivant.

## 4.6 Sulfure d'hydrogène

Comme expliqué ci-dessus, du sulfure d'hydrogène était présent depuis la découverte du champ. Or, la teneur mesurée est de 130 ppm. Ce gaz pourrait être produit par différents mécanismes mais spécifiquement à partir de  $H_2$  comme décrit en 5.2.

## 5 Discussion sur les mesures récentes de la qualité du gaz

Well SREP5 est toujours disponible pour les mesures et c'est l'occasion de comparer des données historiques et des données récentes, des décennies après la découverte et la production. Cette comparaison est utile pour comprendre ce qu'il advient de l'hydrogène dans le sous-sol à long terme, que ce soit dans les champs de gaz naturel ou dans les gisements artificiels (réservoirs souterrains de stockage de gaz).

### 5.1 Mesures récentes de la qualité du gaz

Le [tableau 2](#) présente des mesures récentes de la qualité du gaz (2018) réalisées par les auteurs sur le puits SREP5. Ces mesures ont été réalisées avec BIOGAS 5000 (produit Geotech, certifié Atex pour  $CH_4$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2S$ ) pour tous les gaz sauf l'hydrogène et avec Portasens II (produit de technologie analytique certifié) pour la teneur en hydrogène.

La pression en tête de puits SREP5 est la pression atmosphérique (selon une mesure approximative basée sur le niveau hydrostatique réalisée par les auteurs).

Pour obtenir des valeurs stabilisées de teneur en H<sub>2</sub> (sans variation en une demi-heure), une ou deux heures sont nécessaires.

La teneur en hydrogène du gaz est inférieure aux valeurs initiales ( Tab.2 ) et il convient de vérifier si cette valeur est représentative du gaz restant dans le réservoir.

La connexion au fond du trou entre le puits et le réservoir n'est pas claire. Le puits est constitué d'un tubage de 9 "et un tube de 7" équipé d'un tamis est censé être à l'intérieur du puits mais l'anneau entre les deux tubes n'est pas isolé.

La teneur en H<sub>2</sub> mesurée peut être due à la corrosion du tubage. Ce scénario est réaliste. Les mesures ont été effectuées après environ une heure de période de concentration décroissante et une demi-heure de stabilisation. Le volume de gaz produit par le puits a été estimé à environ 30 l / h par différentes méthodologies: taille de la flamme (Étiopie, 2015 -chapitre 2) et 2 types de compteurs donnant un débit maximum (40 l / h) et un débit minimum (27 l / h). Le débit de gaz avec un tel débit a besoin de plusieurs heures pour renouveler entièrement le volume du puits qui est d'environ 8,8 m<sup>3</sup> (354 m de tube 7 "). Une telle période fluide n'était pas possible avant les mesures. Ainsi, il n'est pas exclu que même stabilisée, la teneur en H<sub>2</sub> mesurée soit différente de la concentration du gaz dans le réservoir.

La mesure initiale est d'environ 0,1% supérieure à la mesure stabilisée. Comme l'écoulement est laminaire en puits, on a pu calculer qu'en une demi-heure, les 38 premiers cm du tube sont retirés. La partie supérieure de l'enveloppe de production et la tubulure (environ cm) ne sont pas enterrées puis soumises aux écarts de température et à la condensation d'eau et d'hydrocarbures pendant les périodes très froides. Cela conduit probablement à une corrosion interne plus élevée dans cette partie du puits et à un mauvais état de surface. L'excès d'hydrogène produit au cours de cette période de stabilisation pourrait être estimé à 0,0075 L. Cela peut correspondre à l'hydrogène dû à la corrosion, compte tenu d'un jour de cette corrosion à raison de 2,5 µm / an sur 75 cm de tube 7 ".Patroni, 2007 ) mais semble réaliste selon la situation du puits.

La conclusion de ces analyses est que la concentration mesurée peut être supérieure à la concentration représentative sur le terrain. Cette possibilité ne change pas la conclusion générale tirée de ces nouvelles données:

- La teneur en CO<sub>2</sub> est similaire aux valeurs historiques (environ 5%);
- La teneur en H<sub>2</sub> (hydrogène) a diminué à environ 0,5% ou même moins si le scénario de corrosion décrit ci-dessus doit être considéré.

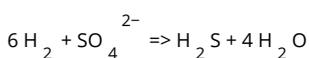
## 5.2 Discussion sur l'évolution de la teneur en hydrogène

Pour interpréter cette évolution de la teneur en hydrogène, plusieurs hypothèses pourraient être proposées.

Le premier point à clarifier est l'homogénéité de cette concentration dans le champ de gaz. Les données récentes sont mesurées sur le puits SREP5. La valeur de 5% H<sub>2</sub> correspond au puits SREP2 et la valeur mesurée sur le puits Pagniez Bregi était de 3,7%. Nous ne disposons d'aucune information sur la mesure (0%) donnée par Locherer (1927) . C'est la raison pour laquelle en douter semble raisonnable.

Une ségrégation gravimétrique de H<sub>2</sub> dans le réservoir peut exister et expliquer ces différences. En effet, les profondeurs (sous le niveau de la mer) de la couche de gaz avaleur ne varient pas de manière cohérente: +148 m au-dessus du niveau de la mer pour le puits Pagniez-Bregi, +123 m au-dessus du niveau de la mer pour le SREP2 et +120 m au-dessus du niveau de la mer pour le SREP5 . Sur la base de ces données, cette hypothèse n'est pas confirmée.

L'hydrogène pourrait disparaître dans le sous-sol en raison de réactions biochimiques ( Marcogaz 2016 ; Gregory *et al.* , 2019 ). L'un d'eux est la consommation de sulfate par les bactéries sulfato-réductrices (SRB): selon la réaction suivante:



Aucune analyse de l'eau de formation n'est disponible mais les horizons de gypse sont très proches du réservoir et il est donc très probable que l'eau de la formation contienne des ions SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>.

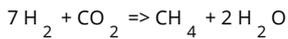
Un bilan matière approximatif sur SO<sub>4</sub> consommé et H<sub>2</sub>S produit confirme la faisabilité du scénario: le volume de formation d'eau, même sans apport d'eau avec une concentration raisonnable de SO<sub>4</sub> (quelques mg / l) pourrait être en mesure de fournir le SO<sub>4</sub> nécessaire pour consommer l'essentiel de l'hydrogène du

champ. Il est possible que la majeure partie de H<sub>2</sub>S créée ait été retirée pendant la production, et le reste a été dissous dans l'eau de formation, mais il est difficile d'effectuer un calcul de bilan massique car la teneur initiale en H<sub>2</sub>S dans le gaz est inconnue.

La question est de clarifier quand la réaction a commencé: après la migration du gaz vers le piège 2 (l'eau de la formation de Buntsandstein ne contient pas de sulfate), pendant l'épuisement des gaz, après l'appauvrissement des gaz?

Une partie du H<sub>2</sub>S était probablement dans le gaz avant la découverte du champ (voir cristallisation au-dessus du soufre dans les noyaux de réservoir) mais la principale réaction de production de H<sub>2</sub>S a peut-être commencé depuis la découverte et contribue à la diminution de H<sub>2</sub>. Le processus de forage peut avoir fourni à SRB ou nourrir SRB des nutriments ( [Gregory et al. , 2019](#) ).

Une autre réaction possible capable de consommer de l'hydrogène, est la méthanogenèse:



Cette réaction est possible à haute température. Cette réaction est suspectée d'être possible à basse température en raison de bactéries. ( [Buzek et coll. , 1994](#) ; [Panfilov, 2010](#) ; [Gregory et coll. , 2019](#) ; [Ranchou-Peyruse et al. , sous presse](#) ). Si cette réaction s'était produite dans le réservoir de Vaux-en-Bugey, la teneur en CO<sub>2</sub> aurait diminué. Les valeurs du [tableau 2](#) ne montrent pas de diminution nette de la teneur en CO<sub>2</sub>. Mais la teneur en CO<sub>2</sub> du gaz est directement liée à un autre équilibre géochimique avec le carbonate et peut changer indépendamment de la méthanogenèse. En conclusion, la réaction de méthanogenèse n'est pas démontrée mais pas totalement exclue.

## 8 Conclusion

L'étude de cas du champ de Vaux-en-Bugey contribuerait à une meilleure compréhension de l'origine naturelle de l'hydrogène et des mécanismes géochimiques lorsqu'il est stocké dans le sous-sol.

Même dans un contexte géologique bien connu comme le Jura, l'origine de l'hydrogène dans le gaz reste incertaine. Vaux-en-Bugey semble être un cas d'accumulation d'hydrogène dans la croûte continentale qui n'est pas lié à un mécanisme de serpentisation des ophiolites à proximité qui est le principal décrit.

Plusieurs hypothèses ont été envisagées. Selon les auteurs, le mécanisme le plus probable est la radiolyse de l'eau pour l'hydrogène et l'origine radiogène pour l'hélium, à partir d'une source profonde du sous-sol (ou éventuellement de schistes chauds autuniens proches) migrant le long de failles hercyniennes anciennes et toujours actives. L'autre mécanisme probable est la génération d'hydrogène mécano-radicalaire, la cataclase, due au frottement le long de failles peu profondes ou profondes.

Le moment du remplissage du réservoir de gaz n'a pas pu être résolu correctement. Néanmoins, les auteurs prévoient une meilleure probabilité de charge de gaz lors de la poussée, ce qui a permis la migration d'une ancienne accumulation de gaz à Buntsandstein.

L'analyse isotopique de l'hydrogène dans CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> et de He associé fournirait des données utiles.

Une analyse récente du gaz suggère fortement que la teneur en hydrogène a diminué depuis la découverte du gisement, il y a un siècle. Le mécanisme correspondant est probablement la consommation par SRB (bactéries sulfato-réductrices). L'analyse de l'eau et la modélisation géochimique des réservoirs confirmeraient cette hypothèse.

## Remerciements

Les auteurs remercient MJ Reverdy pour sa gentillesse de leur faire découvrir l'histoire du champ gazier de Vaux-en-Bugey et pour son aide sur place.

Ils remercient les Archives Saint-Gobain de fournir des données originales inédites (Torcieu well field log. [Fig. S2](#)) et G. Dromart pour avoir fourni des documents historiques sur le terrain ([Fig. S3](#)).

Ils remercient P. Houel et R. Vially pour leurs discussions et leur soutien.

## Les références

Angino EE, Zeller EJ, Dreschhoff GAM, Goebel ED, Coveney RMJ. 1990. Distribution spatiale de l'hydrogène dans le gaz du sol dans le centre du Kansas, USA. In: *Géochimie des éléments et composés gazeux*. Athènes (Grèce): Theophratus Publishers, pp. 485–493. [\[Google Scholar\]](#)

Ballentine CJ, Lollar BS. 2002. Concentration régionale des eaux souterraines d'azote et de gaz rares dans le champ de gaz géant de Hugoton-Panhandle, États-Unis. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 66 (14): 2483–2497. [\[CrossRef\]](#) [\[Google Scholar\]](#)

Bergerat F, Mugnier JL, Guellec S, Truffert C, Cazes M, Damotte B *et al.* 1990. Tectonique extensionnelle et affaissement du bassin de la Bresse: une interprétation à partir des données ECORS. *Mémoires de la Société géologique de France* 156: 145–156. [\[Google Scholar\]](#)

Bidault des Chaumes A. 1914. La fabrication de l'hydrogène pour le gonflement des ballons militaires en France et en Allemagne. *Le Génie Civil* 1685: 401–407. Disponible depuis <https://gallica.bnf.fr/> (dernière consultation 22/08/2019). [\[Google Scholar\]](#)

Bjornstad BN, McKinley JP, Stevens TO, Rawson SA, Fredrickson JK, Long PE. 1994. Génération d'hydrogène gazeux suite à des forages dans la zone saturée. *Surveillance et assainissement des eaux souterraines* 14 (4): 140–147. [\[CrossRef\]](#) [\[Google Scholar\]](#)

Blanc G, Doligez B, Lajat D, Masclé A. 1991. Evaluation du potentiel pétrolier des formations paléozoïques de la Bresse et de sa bordure jurassienne, France. *Bulletin de la Société géologique de France* 162 (2): 409–422. [\[Google Scholar\]](#)

Bonte A. 1948. Rapport de visite aux sondages de Vaux-en-Bugey, BRGG-A0138. Disponible depuis <http://infoterre.brgm.fr/rapports/BRGG-A0138.pdf> (dernière consultation le 31/08/2019). [\[Google Scholar\]](#)

Bregi L. 1909. Présence de gaz naturel dans un sondage à Vaux (Ain). *Annales de la Société géologique du Nord*. LXXXVIII: 23–27. Disponible sur <http://ficheinfoterre.brgm.fr/InfoterreFiche/ficheBss.action?id=BSS001SDBN> (dernière consultation 31/08/2019). [\[Google Scholar\]](#)

BRGM, ADEME. 2008. Évaluation du potentiel géothermique du réservoir clastique «Buntsandstein» du bassin bressan. Rapport final. BRGM / RP-56462-FR. Disponible depuis <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-56462-FR.pdf> (dernière consultation. 2019/08/31). [\[Google Scholar\]](#)

Brown AA. 2010. Formation de gaz à haute teneur en hélium: Un guide pour les explorateurs. Disponible depuis [http://www.searchanddiscovery.com/pdfz/documents/2010/80115brown/ndx\\_brown.pdf.html](http://www.searchanddiscovery.com/pdfz/documents/2010/80115brown/ndx_brown.pdf.html) (dernière consultation 23/08/2019). [\[Google Scholar\]](#)

Bureau Central Sismologique Français. 2006. Séisme d'Ambérieu-en-Bugey (départ.01) du 11 janvier 2006. Rapport préliminaire. Disponible depuis [http://www.franceseisme.fr/donnees/intensites/2006/060111\\_1032/RapportBCSF\\_060111.pdf](http://www.franceseisme.fr/donnees/intensites/2006/060111_1032/RapportBCSF_060111.pdf) (dernière consultation. 2019/08/31). [\[Google Scholar\]](#)

Burnham AK. 2010. Chimie et cinétique de la cornue des schistes bitumineux. Dans: *Le schiste bitumineux: une solution au dilemme des combustibles liquides*, American Chemical Society, pp. 115–134. [\[CrossRef\]](#) [\[Google Scholar\]](#)

Buzek F, Onderka V, Vančura P, Wolf I. 1994. Étude isotopique du carbone de la production de méthane dans un réservoir de stockage de gaz de ville. *Fuel* 73 (5): 747–752. [\[CrossRef\]](#) [\[Google Scholar\]](#)

Byrne DJ, Barry PH, Lawson M, Ballentine CJ. 2018. Gaz nobles dans les systèmes pétroliers conventionnels et non conventionnels. *Geological Society, Londres, Publications spéciales*, 468 (1): 127–149. [\[CrossRef\]](#) [\[Google Scholar\]](#)

Cayeux L. 1922. Les minerais de fer oolithique de France. Paris: Imprimerie Nationale. [\[Google Scholar\]](#)

Charpy L. 1990. Sous le charme de Vaux-en-Bugey. Vaux en Bugey: Foyer rural de Vaux-en-Bugey. [\[Google Scholar\]](#)

- Chiron JC, Kerrien Y. 1979. Carte géologique de la France 1: 250 000, Feuille 29 Lyon. *Bureau de Recherches Géologiques et Minières* (Orléans, France). [Google Scholar]
- Crossey LJ, Karlstrom KE, Springer A, Newell D, Hilton DR, Fischer T. 2009. Dégazage du CO<sub>2</sub> dérivé du manteau et He des sources dans le sud du plateau du Colorado - Connexions néotectoniques et implications pour les systèmes d'eaux souterraines. *Bulletin 121 de la Geological Society of America* (7-8): 1034–1053. [CrossRef] [Google Scholar]
- Debrand-Passard S, Courbouleix S, Lienhardt MJ. 1984. Synthèse géologique du sud-est de la France. *Mém. Taureau. Rech. Géol. Minières* (Orléans) 125: 615. [Google Scholar]
- De La Taille C. 2015. Évaluation de l'activité tectonique quaternaire des failles du Jura Méridional (France). Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes. [Google Scholar]
- Deville E, Prinzhofer A, D Pillot, Vacquand C, Sissman O. 2010. Interaction péridote-eau générant des voies de migration de fluides riches en N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> dans un contexte de subduction: processus courants dans les ophiolites d'Oman, de Nouvelle-Calédonie, des Philippines et de Turquie. Dans: *Eos Transactions, American Geophysical Union, Fall Meeting 2010, Abstract # T13A-2184D*. [Google Scholar]
- Drobner E, Huber H, Wächtershäuser G, Rose D, Stetter KO. 1990. Formation de pyrite liée au dégagement d'hydrogène dans des conditions anaérobies. *Nature* 346 (6286): 742. [CrossRef] [Google Scholar]
- Dromart G, Monier P, Curial A, Moretto R, Guillocheau F 1994. Cycles triasiques transgressifs-régressifs en Bresse-Jura et bassins adjacents, est de la France. In: *Géologie des hydrocarbures et du pétrole de la France*. Berlin, Heidelberg: Springer, pp. 347–360. [CrossRef] [Google Scholar]
- Etiopie G. 2015. Infiltration de gaz naturel. Le dégazage des hydrocarbures de la terre. Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, Londres: Springer. [Google Scholar]
- Etiopie G, Schoell M. 2014. Gaz abiologique: atypique, mais pas rare. *Éléments* 10 (4): 291-296. [CrossRef] [Google Scholar]
- Gage BD, Driskill DL. 2003. Ressources en hélium des États-Unis. Disponible depuis <http://digitalcommons.unl.edu/usblmpub/13> (dernière consultation le 26/08/2019). [Google Scholar]
- Glangeaud L. 1953. Tectonique comparée des nappes de glissement dans le Jura Bressan et diverses régions méditerranéennes. *Bulletin de la Société géologique de France* III-44: 697–702. [CrossRef] [Google Scholar]
- Gregory SP, Barnett MJ, Field LP, Milodowski AE. 2019. Cycle de l'hydrogène microbien sous la surface: occurrence naturelle et implications pour l'industrie. *Microorganismes* 7 (2): 53. [CrossRef] [Google Scholar]
- Grellet B, Combes P, Granier T. 1993. Sismotectonique de la France métropolitaine dans son cadre géologique et géophysique: avec atlas de 23 cartes au 1/4 000 000<sup>e</sup> et une carte au 1/1 000 000<sup>e</sup> (Vol. 2). Société géologique de France. [Google Scholar]
- Gudéfin H. 1980. Région de l'Est lyonnais. Aperçu géologique d'après les forages profonds. BRGM 79 SGN 596 RHA. Disponible sur <http://infoterre.brgm.fr/rapports/79-SGN-596-RHA.pdf> (dernière consultation le 31/08/2019). [Google Scholar]
- Guellec S, Lajat D, Mascle A, Roue F, Tardy M. 1990. Profilage sismique profond et potentiel pétrolier dans les Alpes occidentales: Contraintes avec données ECORS, coupes équilibrées et modélisation des hydrocarbures. Dans: *Le potentiel du profilage sismique profond pour l'exploration des hydrocarbures*, pp. 425–437. [Google Scholar]

Hirose T, S Kawagucci, Suzuki K. 2011. Mechanoradical H<sub>2</sub> génération pendant simulées failles:

implications pour une biosphère souterraine entraînée par le séisme. *Lettres de recherche géophysique* 38 (17). [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]

SI P. 2002. Jura méridional. Rapport régional. Rueil-Malmaison: IFP-CGG. [[Google Scholar](#)]

Jeandel E. 2008. Suivi géochimique par couplage entre les gaz rares et les isotopes du carbone: étude d'un réservoir naturel. Dissertation doctorale. Disponible sur <https://tel.archives-ouvertes.fr/> (dernière consultation 26/08/2019). [[Google Scholar](#)]

Johnson K, Spiezo M, Wong T. 2015. Du gaz de schiste à l'éthylène. Disponible depuis [https://processdesign.mccormick.northwestern.edu/index.php/Shale\\_Gas\\_to\\_Ethylene\\_\(G2\)](https://processdesign.mccormick.northwestern.edu/index.php/Shale_Gas_to_Ethylene_(G2)) (dernière consultation. 2019/08/26). [[Google Scholar](#)]

Jouanne F. 1994. Mesure de la déformation actuelle des Alpes occidentales et du Jura par comparaison de données géodésiques historiques. Thèse de doctorat. Mém. Sci. Terre, Univ. de Savoie. [[Google Scholar](#)]

Jouanne F, Ménard G, Jault D. 1994. Déformation verticale actuelle des Alpes du Nord-Ouest / Jura Sud: comparaison entre triangulations historiques. *Geophys J Int* 119: 151-165. [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]

Jouanne F, Ménard G, Darmendrail X. 1995. Déplacements verticaux actuels dans les Alpes du nord-ouest et le sud du Jura: données de comparaisons de nivellement. *Tectonics* 14 (3): 606-616. [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]

Kerrien Y, Monjuvent G. 1990. Notice explicative de la feuille Belley (1/50 000). Orléans, France: Éditions du BRGM. [[Google Scholar](#)]

Larin N. 1993. *Hydridic Earth: La nouvelle géologie de notre planète primordialement riche en hydrogène*. Dans: Warren Hunt C, éd. Calgary, Alberta, Canada: Éditions Polar. [[Google Scholar](#)]

Larin N, Zgonnik V, Rodina S, Deville E, Prinzhofer A, Larin VN *et al.* 2015. Infiltration d'hydrogène moléculaire naturel associée à des dépressions arrondies superficielles sur le craton européen en Russie. *Recherche sur les ressources naturelles* 24 (3): 369-383. [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]

Lepape A. 1958. Les gaz rares in Nouveau traité de chimie minérale de P. Pascal-Tome XII. Paris: Masson, pp. 113-178. [[Google Scholar](#)]

Lin LH, Hall J, Lippmann-Pipke J, Ward A, Ward A, Sherwood Lollar B, DeFlaun M *et al.* 2005. H<sub>2</sub> radiolytique dans la croûte continentale: l'énergie nucléaire pour les communautés microbiennes souterraines profondes. *Géochimie, géophysique, géosystèmes* 6 (7): 1-13. [[Google Scholar](#)]

Littke R, Krooss B, Idiz E, Frielingsdorf J. 1995. Azote moléculaire dans les accumulations de gaz naturel: génération à partir de matière organique sédimentaire à haute température. *Bulletin AAPG* 79 (3): 410-430. [[Google Scholar](#)]

Locherer J. 1927, Les sources de gaz naturels en France. Le gisement de Vaux-en-Bugey (Ain). *Le Génie Civil* XC (4) 2319: 99-102. Disponible sur <https://gallica.bnf.fr> (dernière consultation 31/08/2019). [[Google Scholar](#)]

Madritsch H, Fabbri O, Schmid S. 2011. La chaîne plissée du Jura: évidences morphologiques en faveur d'une activité post-Pliocène et discussion du contexte géodynamique actuel. *Géochronique* 117: 41-44. [[Google Scholar](#)]

Malvoisin B. 2013. Conditions réductrices associées à la serpentinitisation: suivi magnétique de l'hydratation de l'olivine de San Carlos, étude de cas naturels et application à la production industrielle d'H<sub>2</sub>. Thèse de doctorat, Grenoble. [[Google Scholar](#)]

Marcogaz. 2016. Guide des adjuvants hydrogène / gaz naturel dans les installations de stockage de gaz souterraines. Disponible sur <https://www.marcogaz.org/publications-1/documents/> (dernière

consultation. 2019/08/31). [\[Google Scholar\]](#)

Mariton D. 1981. Bassin houiller du bas Dauphiné: essai de synthèse. BRGM 80 SGN 674 GEO. Disponible sur <http://infoterre.brgm.fr/rapports/80-SGN-674-GEO.pdf> . [\[Google Scholar\]](#)

Mazenot G. 1936. Les ressources minérales de la région lyonnaise. *Géocarrefour* 12 (2): 123–258. [\[Google Scholar\]](#)

Milesi V, Guyot F, Brunet F, Richard L, Recham N, Benedetti M *et al.* 2015. Formation de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> et de carbone condensé à partir de la dissolution de la sidérite entre 200 et 300 ° C et à 50 MPa. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 154: 201–211. [\[CrossRef\]](#) [\[Google Scholar\]](#)

Nivin VA. 2016. Gaz libres d'hydrogène et d'hydrocarbures du gisement de loparite de Lovozero (péninsule de Kola, nord-ouest de la Russie). *Géochimie appliquée* 74: 44–55. [\[CrossRef\]](#) [\[Google Scholar\]](#)

Panfilov M. 2010. Stockage souterrain de l'hydrogène: auto-organisation *in situ* et production de méthane. *Transport in Porous Media* 85 (3): 841–865. [\[CrossRef\]](#) [\[Google Scholar\]](#)

Patroni JM. 2007. Évaluation de la durée de vie d'un puits de stockage de gaz naturel du coût d'entretien du champ de puits. *Oil & Gas Science and Technology – Revue de l'IFP* 62 (3): 297–309. [\[CrossRef\]](#) [\[Google Scholar\]](#)

Pfiffner OA. 2014. Géologie des Alpes. John Wiley et fils. [\[Google Scholar\]](#)

Philippe Y. 1994. Zone de transfert dans la ceinture de poussée du Jura Sud (Est de la France): Géométrie, développement et comparaison avec des expériences de modélisation analogique. In: *Géologie des hydrocarbures et du pétrole de la France* . Berlin, Heidelberg: Springer, pp. 327–346. [\[CrossRef\]](#) [\[Google Scholar\]](#)

Philippe Y. 1995. Rampes latérales et zones de transfert dans les chaînes plissées: géométrie, condition de formation et pièges structuraux associés. Thèse de doctorat, Université de Savoie, Chambéry. [\[Google Scholar\]](#)

Prinzhofer A, Deville E. 2015. Hydrogène naturel. La prochaine révolution énergétique? Belin. [\[Google Scholar\]](#)

Prinzhofer A, Cissé CST, Diallo AB. 2018. Découverte d'une importante accumulation d'hydrogène naturel à Bourakeboucou (Mali). *Journal international de l'énergie hydrogène* 43 (42): 19315–19326. [\[CrossRef\]](#) [\[Google Scholar\]](#)

Prinzhofer A, Moretti I, Francolin J, Pacheco C, d'Agostino A, Werly J *et al.* 2019. Émission continue d'hydrogène naturel des bassins sédimentaires: l'exemple d'une structure brésilienne émettrice de H<sub>2</sub> . *Journal international de l'énergie hydrogène* 44 (12): 5676-5685. [\[CrossRef\]](#) [\[Google Scholar\]](#)

Pullan CP, Berry MA. 2019. Parc pétrolier d'origine paléozoïque dans le Jura en France et en Suisse. Dans: Monaghan AA, Underhill JR, Hewett AJ, Marshall JEA, eds. *Jeux paléozoïques du nord-ouest de l'Europe* . Geological Society, Publication spéciale 471, pp. 365–387. [\[Google Scholar\]](#)

Ranchou-Peyruse M, Auguet JF, Mazière C, Restrepo-Ortiz CX, Guignard M, Dequidt D *et al.* Le stockage géologique du gaz façonne la vie profonde. *Environmental Microbiology* (sous presse), Wiley-Blackwell. [\[Google Scholar\]](#)

Ricour J. 1956. Le chevauchement de la bordure occidentale du Jura sur la Bresse dans la région de Lons-Le Saunier. *Taureau. Ver. Schweizer Petrol. Geol. und Ing* 23 (64): 57–70. [\[Google Scholar\]](#)

Rocher M, Cushing M, Lemeille F, Baize S. 2004. L'île Crémieu (Jura, France), un plateau calcaire épargné par la tectonique? *Comptes Rendus Geoscience* 336 (13): 1209-1218. [\[CrossRef\]](#) [\[Google Scholar\]](#)

Schoeffler J. 1941. Les sondages aux gaz de Vaux-en-Bugey. *Annales des mines françaises* T17: 205–252. Disponible sur <https://gallica.bnf.fr> (dernière consultation 31/08/2019). [\[Google Scholar\]](#)

Sokolov V. 1974. Géochimie des gaz naturels. Moscou: Édition MIR. [\[Google Scholar\]](#)

Sugisaki R, Ido M, Takeda H, Isobe Y, Hayashi Y, Nakamura N *et al.* 1983. Origine de l'hydrogène et du dioxyde de carbone dans les gaz de défaut et sa relation avec l'activité des défauts. Le *Journal of Geology* 91 (3): 239–258. [\[Google Scholar\]](#)

Toniazzo V. 1998. Approche des mécanismes d'oxydation de la pyrite par thiobacillus ferrooxidans grâce à la modélisation morpho-chimique de la surface minérale: rôle fondamental des phases superficielles oxydées. Thèse de doctorat, Nancy 1. [\[Google Scholar\]](#)

Truffert C, Burg JP, Cazes M, Bayer R, Damotte B, Rey D. 1990. Structures crustales sous le Jura et la Bresse: contraintes sismiques et gravimétriques le long des profils ECORS Bresse-Jura et Alpes II. *Mémoires de la Société géologique de France* 156: 157–164. [\[Google Scholar\]](#)

Upham DC, Agarwal V, Khechfe A, Snodgrass ZR, Gordon MJ, Metiu H *et al.* 2017. Métaux fondus catalytiques pour la conversion directe du méthane en hydrogène et en carbone séparable. *Science* 358 (6365): 917–921. [\[CrossRef\]](#) [\[Google Scholar\]](#)

Vincienne H. 1932. La structure en écaillés de la région d'Ambérieu et l'âge des derniers mouvements jurassiens. *CR Acad. Sci.* (Paris) 195: 258. [\[Google Scholar\]](#)

Wang B, Liu Y, Sun X, Ma Y, Zhang L, Ren H *et al.* 2018. Observations hydrogéologiques et géochimiques pour la recherche sur la prévision des tremblements de terre en Chine: un bref aperçu. *Géophysique pure et appliquée* 175 (7): 2541–2555. [\[CrossRef\]](#) [\[Google Scholar\]](#)

Citer cet article comme suit: Deronzier JF, Giouse H. 2020. Vaux-en-Bugey (Ain, France): le premier champ de gaz produit en France, offrant des enseignements sur l'hydrogène naturel en sous-surface? *BSGF - Bulletin des sciences de la Terre* 191: 7.

## Matériel complémentaire

Figure S1 Profils sismiques ( [Rocher \*et al.\*, 2004](#) ).

Figure S2 Journal du champ du puits de Torcieu, 1917–1919 (archives St Gobain).

Figure S3 Carte de localisation des puits de Vaux-en-Bugey, 1924 (archives ENS Lyon).

[\(Accédez ici\)](#)

## Tous les tableaux

**Tableau 1** Table des marqueurs de Vaux-en-Bugey.

[↑ Dans le texte](#)

**Tableau 2** Données sur la qualité du gaz de Vaux-en-Bugey.

[↑ Dans le texte](#)

## Tous les chiffres



**Fig. 1**

Carte de localisation du champ gazier de Vaux-en-Bugey.

[↑ Dans le texte](#)

**Fig. 2**



Carte structurelle régionale (à partir de [Debrand-Passard et coll. \(1984\)](#) et [Philippe \(1995\)](#), modifié).

[↑ Dans le texte](#)

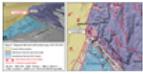


Fig. 3

Carte de localisation du relief et des puits régionaux (MNT, IFP, 2002).

[↑ Dans le texte](#)

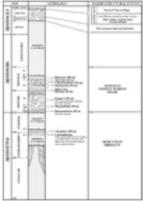


Fig. 4

Lithostratigraphie synthétique pour la région de Vaux-en-Bugey et Torcieu.

[↑ Dans le texte](#)

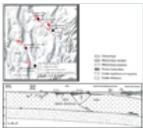


Fig. 5

Données sismiques récentes ([De La Taille C., 2015](#)). Coupe transversale du profil Ecors ([Philippe Y., 1995](#)) - voir emplacement [Figure 2](#).

[↑ Dans le texte](#)



Fig. 6

Événement sismique de Chautagne (1822). Intensité MSK VII-VIII, magnitude (5,5-6). Source BCSF.

[↑ Dans le texte](#)

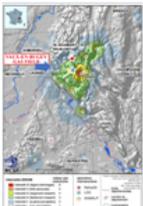


Fig. 7

Événement sismique de Conand (2006). Magnitude (3,7), profondeur de l'épicentre = 1-2 km. Source BCSF.

[↑ Dans le texte](#)

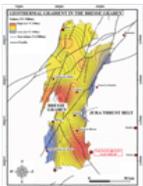


Fig. 8

Gradient géothermique dans le bassin de la Bresse ([BRGM, 2008](#)).

[↑ Dans le texte](#)

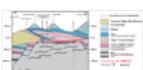


Fig. 9

Coupe transversale interprétative schématique.

[↑ Dans le texte](#)

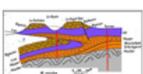
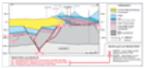


Fig. 10

Coupe transversale interprétative schématique ([Schoeffler, 1941](#)).

[↑ Dans le texte](#)

---

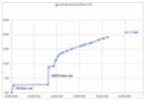


**Fig. 11**

Processus de charge schématiques (champ gazier de Vaux-en-Bugey).

[↑ Dans le texte](#)

---



**Fig. 12**

Historique de production du champ gazier de Vaux-en-Bugey.

[↑ Dans le texte](#)

---



**Fig. 13**

Cross-plot pression / production pour le champ gazier de Vaux-en-Bugey.

[↑ Dans le texte](#)

---

---

## BSGF - Bulletin des sciences de la Terre

Rédacteur en chef: Laurent JOLIVET - [Comité de rédaction](#)

ISSN: 0037-9409 - eISSN: 1777-5817

© SGF ( [Société Géologique de France](#) )



[Mentions légales](#)

[Contacts](#)