

ÉTUDE DE CAS

Comment l'industrie du gaz naturel peut-elle faire progresser les objectifs de double carbone? Une étude de cas de la Chine selon la perspective de la chaîne industrielle

Shouheng Sun^a

DOI : <https://doi.org/10.1522/revueot.v31n3.1525>

RÉSUMÉ. Le gaz naturel apparaît comme une source énergétique de transition idoine, car ses effets socioécologiques sont moins nocifs que le pétrole ou le charbon (p. ex., faible émission de dioxyde de carbone), tandis que son efficacité énergétique est plutôt élevée et que ses coûts d'exploitation sont relativement abordables. Cet article vise à explorer le cas spécifique de la Chine, notamment comment son industrie du gaz naturel peut contribuer à l'atteinte des objectifs de pic d'émissions de CO₂ et de carboneutralité (double carbone) formulés par le gouvernement chinois. Après une introduction au sujet, l'article présente les principes, procédures et processus relatifs à l'exploitation du gaz naturel, puis examine de manière plus détaillée le cas chinois. Une dernière section synthétise l'article et évoque les perspectives en proposant des recommandations quant à l'industrie du gaz naturel en Chine pour cheminer vers la carboneutralité.

ABSTRACT. Natural gas appears to be an appropriate transition energy source, because its socio-ecological effects are less harmful than for oil or coal (e.g., low carbon dioxide emissions), while its energy efficiency is rather high and its operating costs are relatively affordable. This article aims to explore the specific case of China and, in particular, how its natural gas industry can contribute to reaching the objectives of CO₂ emission peaks and carbon neutrality (double carbon) formulated by the Chinese government. After introducing the subject, the article presents the principles, procedures, and processes relating to the exploitation of natural gas, then examines the Chinese case in further detail. A final section summarizes the article and discusses prospects by offering recommendations for the natural gas industry in China to move towards carbon neutrality.

Introduction

Les combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon et, dans certains cas, tourbe; Université de Calgary, s. d.) sont devenus de plus en plus problématiques en raison du dioxyde de carbone, du dioxyde de soufre ou encore de la poussière et de la pollution qui en résultent. De leur côté, les sources d'énergie renouvelable telles que l'éolien et le solaire entraînent des coûts élevés pour un faible rendement énergétique (Zycher, 2019). De plus, bien que communément admises comme étant durables, ces sources d'énergie posent divers problèmes environnementaux, par exemple le recyclage des éoliennes ou des panneaux solaires (Belz et Peattie, 2009; Ertz, 2021).

Toutefois, le gaz naturel s'est imposé comme une option prometteuse, tant sur le plan économique que socioécologique. En effet, Sun et Ertz (2020, 2022) démontrent qu'un de ses sous-ensembles, le gaz naturel liquéfié (GNL), a des impacts plus faibles sur l'environnement et sur la santé humaine que le diesel. De leur côté, Luque et ses collègues (2021) démontrent que le GNL est un carburant alternatif au

^a Professeur adjoint, membre du LaboNFC, Université des sciences et technologies de Pékin

diesel dans la traction ferroviaire. Selon Mena-Carrasco et ses collègues (2012), le gaz naturel utilisé dans le transport et le chauffage est également moins nocif pour la santé humaine.

En somme, le gaz naturel peut contribuer aux besoins énergétiques industriels, commerciaux et domestiques actuels avec des impacts environnementaux et sociaux moindres, sans induire des sacrifices économiques trop lourds. Pour ces raisons, Levi (2013) fait valoir que le gaz naturel peut être considéré comme un « combustible de transition » afin de faciliter la transition du système énergétique mondial actuel des combustibles fossiles conventionnels vers un réseau énergétique à carboneutralité.

Par conséquent, l'objectif de cet article est de fournir un examen des opportunités et des défis pour l'industrie du gaz naturel dans l'atteinte des objectifs de pic d'émissions de CO₂ et de carboneutralité (ci-après « double carbone »). Plus précisément, après un aperçu des principes, des procédures et des processus, l'article aborde les applications actuelles dans le cas spécifique de la Chine et sa tentative d'atteindre la carboneutralité d'ici 2060. Plus précisément, le gouvernement chinois a proposé, lors de la 75^e session ordinaire de l'Assemblée générale des Nations unies en septembre 2020, que les émissions de dioxyde de carbone atteignent un pic d'ici 2030, pour atteindre la carboneutralité d'ici 2060. Contrainte par les objectifs de double carbone, l'industrie chinoise du gaz naturel fait face à de nombreux changements et à des opportunités de développement.

En tant qu'énergie propre à faible émission de carbone, se situant entre les sources d'énergie fossile traditionnelles et d'énergie renouvelable, le gaz naturel a l'avantage non négligeable d'émettre moins de carbone que le charbon et le pétrole, tout en étant moins cher que l'énergie renouvelable. Ainsi, sur la base des caractéristiques de la chaîne de l'industrie du gaz naturel en Chine, cet article analyse le rôle et les avantages du gaz naturel dans l'atteinte des objectifs de double carbone ainsi que dans le développement de nouvelles énergies. Il propose également des recommandations et des mesures pertinentes sur la manière de promouvoir le développement durable de la chaîne de l'industrie du gaz naturel du point de vue du gouvernement, des entreprises, du public et des autres parties prenantes afin de mieux contribuer à l'atteinte des objectifs de double carbone.

Un examen approfondi du cas spécifique de la Chine a également une pertinence plus large pour d'autres pays et territoires puisque les objectifs de carboneutralité sont partagés par plusieurs gouvernements. Néanmoins, leurs possibilités d'action pourraient différer dans leur accès aux réserves de gaz naturel.

1. Caractéristiques du gaz naturel

1.1 Composantes et sources

Le gaz naturel fait référence au mélange de gaz d'hydrocarbures et de gaz autres que les hydrocarbures contenus sous la surface de la Terre, y compris le gaz de gisement de pétrole, le gaz de gisement de gaz, le gaz de houille et le biogaz, etc. (Faramawy et collab., 2016; Snowdon, 2001). Le gaz naturel a pour principal composant le méthane (environ 85 %) et comprend de petites quantités d'éthane (9 %), de propane (3 %), d'azote (2 %) et de butane (1 %) (Faramawy et collab., 2016; Moore et collab., 2014). Actuellement, les principales sources de gaz naturel sont le gaz de gisement de pétrole, le gaz de gisement de gaz et le gaz de schiste.

1.2 Utilisations

Le gaz naturel extrait est transporté de la tête de puits à l'usine de traitement, puis il est transformé en gaz naturel propre à la vente aux consommateurs après élimination des hydrocarbures, de la vapeur et des autres impuretés (Makogon, 2010; Zou, Yang et collab., 2018). Il peut être utilisé comme combustible et comme matière première chimique. Au départ, il était un produit associé au pétrole, et les revenus obtenus servaient principalement à compenser ou à réduire le coût d'exploitation du pétrole brut (Faramawy et collab., 2016; Makogon, 2010).

En outre, il présente également les caractéristiques d'un prix bas, d'une efficacité thermique élevée et de faibles émissions (Dyatlov et collab., 2020; Ortega et collab., 2021). Par conséquent, il est principalement destiné au marché alternatif de l'énergie traditionnelle (Litvinenko, 2020; Safari et collab., 2019). Or, avec l'augmentation de la demande ainsi que le développement continu de son exploitation et de son utilisation, le gaz naturel est progressivement devenu un produit énergétique indépendant et une matière première industrielle importante.

Il a été largement utilisé comme matière première pour la fabrication de produits chimiques tels que l'acétaldéhyde, l'acétylène, l'ammoniac, le noir de carbone, l'éthanol, le formaldéhyde, les hydrocarbures, les huiles hydrogénées, le méthanol, l'acide nitrique, le gaz de synthèse et le chlorure de vinyle (Beylot et collab., 2019; Eminov et collab., 2021; Sha et collab., 2020). Le gaz naturel peut être transporté directement par pipeline jusqu'aux utilisateurs finaux pour un usage domestique et industriel.

1.3 Formes d'application

En tant qu'un des carburants alternatifs les plus anciens et largement utilisés, il a principalement deux formes d'application pratique : le gaz naturel comprimé (GNC) et le gaz naturel liquéfié (GNL) (Hagos et Ahlgren, 2017; Pourahmadiyan et collab., 2021).

D'abord, le **gaz naturel comprimé (GNC)** fait référence au gaz naturel à l'état gazeux comprimé à une pression ≥ 10 et < 25 mégapascals de pression (MPa) (Boretti et collab., 2013). Il a la même composition que le gaz naturel par pipeline, le composant principal étant le méthane (CH_4). Il est généralement pressurisé et stocké à l'état gazeux dans un conteneur. Le GNC peut être produit non seulement à partir de gaz naturel provenant de gisements de pétrole et de gaz, mais également à partir de biogaz produit artificiellement (dont le composant principal est le CH_4) (Singhal et collab., 2017). Il peut être utilisé comme carburant pour véhicule, et ce véhicule alimenté au GNC est appelé un véhicule au gaz naturel ou VGN (en anglais, NGV pour *natural gas vehicle*). Enfin, le GNC peut également être utilisé pour fabriquer du GNL (Farhad et collab., 2008; Ikealumba et Wu, 2014).

De son côté, le **gaz naturel liquéfié (GNL)** est du gaz naturel qui est comprimé et refroidi jusqu'à son point de congélation ($-161,5$ °C) pour devenir liquide (Kanbur et collab., 2017). Habituellement, il est stocké dans un réservoir le maintenant à son point de congélation et à 0,1 MPa (Farhad et collab., 2008). Son composant principal est le méthane, qui est transporté par des navires adaptés ou par des pétroliers. Le GNL est incolore, inodore, non toxique et non corrosif. Son volume est d'environ 1/625 du même volume de gaz naturel à l'état gazeux, et sa masse n'est que d'environ 45 % du même volume d'eau (Economides et Wood, 2009; Sun et Ertz, 2022). Le GNL est un liquide cryogénique formé par surgélation du gaz naturel après déshydratation et désulfuration. Après purification et congélation, les impuretés nocives sont éliminées et la pureté est encore améliorée par rapport au GNC, de sorte que les produits de combustion sont plus propres et que les avantages pour la protection de l'environnement sont plus importants (He et collab., 2019; Pourahmadiyan et collab., 2021).

Le gaz naturel est un des gaz les plus sûrs. Il ne contient pas de monoxyde de carbone et est plus léger que l'air. Une fois qu'il fuit, il se propage immédiatement vers le haut et ne s'accumule pas facilement pour former un gaz explosif. La sécurité est donc relativement plus élevée que pour les autres carburants (Ikealumba et Wu, 2014; Kanbur et collab., 2017).

2. Applications en cours et étude de cas

2.1 Avantages et effets potentiels du gaz naturel pour l'atteinte des objectifs de double carbone

Parmi la consommation d'énergie de la Chine, le charbon représente 64 %, le pétrole 18 %, le gaz naturel 6 % et l'énergie renouvelable environ 12 % (Gao et collab., 2022; Zheng, 2022). Bien que le meilleur moyen de neutraliser le carbone soit d'utiliser des sources d'énergie renouvelable pour remplacer les sources d'énergie fossile, ces dernières joueront un rôle important pendant une certaine période, en raison de la longue durée de la transformation énergétique, des politiques techniques existantes, de la sécurité énergétique et d'autres problèmes (Li, 2022; Lv, 2022). À l'heure actuelle, l'objectif de la transformation énergétique en Chine est de retirer le charbon (Li, 2022). Considérant que les substituts de combustibles non fossiles tels que l'énergie éolienne, l'énergie photovoltaïque et l'énergie solaire sont encore au stade précoce de la transformation énergétique, le gaz naturel serait donc la principale énergie alternative au charbon (Ma et collab., 2021; Wang, 2022). En fait, il ne fait aucun doute que le gaz naturel, au lieu du charbon, joue un rôle positif dans la réduction des émissions de carbone.

Les principaux avantages caractéristiques du gaz naturel sont les suivants :

1. *Nettoyage*

Le principal composant du gaz naturel est le méthane, et ses principales sources de pollution sont le soufre et une très petite quantité d'azote (Lopatin, 2020; Zou, Yang et collab., 2018). Les émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre sont moindres par rapport à celles du charbon et du pétrole (Moore et collab., 2014; Zou, Yang et collab., 2018). Ainsi, comparativement au charbon, le gaz naturel est très propre. Par exemple, contrairement à la production d'électricité par le charbon, le gaz naturel peut réduire le dioxyde de carbone de 45 % à 55 % (Li et collab., 2020; Ma et collab., 2021). De plus, puisque le gaz naturel est une énergie gazeuse, le soufre contenu est facile à éluer (c.-à-d. séparer) (Lv, 2022; Zou, Zhao et collab., 2018). Dans l'industrie sidérurgique, l'utilisation du gaz naturel au lieu du charbon dans le processus de production peut réduire les émissions de dioxyde de carbone de 36 % (Li, 2022; Lv, 2022). De plus, le gaz naturel peut réduire la pollution et le carbone en remplaçant les produits pétroliers dans le transport longue distance. C'est le carburant le plus propre et à plus faible teneur en carbone avec le plus d'avantages comparatifs, du moins avant l'application à grande échelle des nouvelles énergies (p. ex., l'électricité renouvelable) dans les domaines du transport par poids lourd et du transport maritime (Boretti et collab., 2013; Hagos et Ahlgren, 2017).

2. *Pouvoir calorifique élevé et efficacité de combustion élevée*

Par rapport aux sources d'énergie fossile traditionnelles, le gaz naturel permet d'économiser plus de 20 % d'énergie et a un taux d'utilisation global de l'énergie de plus de 80 % (Lopatin, 2020; Lv, 2022; Zhou et collab., 2022; Zou, Yang et collab., 2018), ce qui réduit de 1,79 milliard de tonnes les émissions de dioxyde de carbone, de 140 millions de tonnes les émissions de dioxyde de soufre et de 22 milliards de tonnes les émissions de poussière (Gao et collab., 2022; Zheng, 2022). Cela réduit ainsi considérablement les émissions de polluants atmosphériques et contribue à préserver l'atmosphère (Gao et collab., 2022; Zheng, 2022).

La consommation de gaz naturel de la Chine a un certain potentiel de croissance. En 2020, ce pays était le troisième consommateur de gaz naturel dans le monde, avec plus de 238 millions de mètres cubes (CIA World Factbook, 2020, cité dans Index Mundi, s. d.). Avec la promotion de l'urbanisation, l'amélioration des installations du réseau de canalisations, l'amélioration économique et les politiques de protection de l'environnement, la consommation de gaz naturel de la Chine augmentera considérablement.

Les objectifs de double carbone constituent la principale stratégie nationale de la Chine visant à promouvoir un développement économique et social de haute qualité grâce à la transformation du système énergétique, et à promouvoir la transformation et le développement du système énergétique des sources d'énergie fossile aux sources d'énergie renouvelable. À l'heure actuelle, la Chine possède un réseau énergétique dominé par le charbon, et la transition énergétique doit résoudre les problèmes de sécurité énergétique et de stabilité d'approvisionnement causés par le caractère multiéchelle, la volatilité et l'incertitude des sources d'énergie renouvelable (Gao et collab., 2022; Ma et collab., 2021).

Il est donc important pour les autorités gouvernementales et territoriales de ce pays d'explorer une voie de développement réalisable pour la transition énergétique. Le gaz naturel est une énergie fossile à fort potentiel dans tous les domaines de l'approvisionnement et de la consommation. Il jouera donc potentiellement un rôle important dans la promotion des objectifs de double carbone de la Chine.

2.2 Caractéristiques de la chaîne de l'industrie du gaz naturel en Chine

La chaîne de l'industrie chinoise du gaz naturel est divisée en trois parties : 1) l'exploration et la production en amont, 2) le transport intermédiaire et 3) la distribution et la consommation en aval.

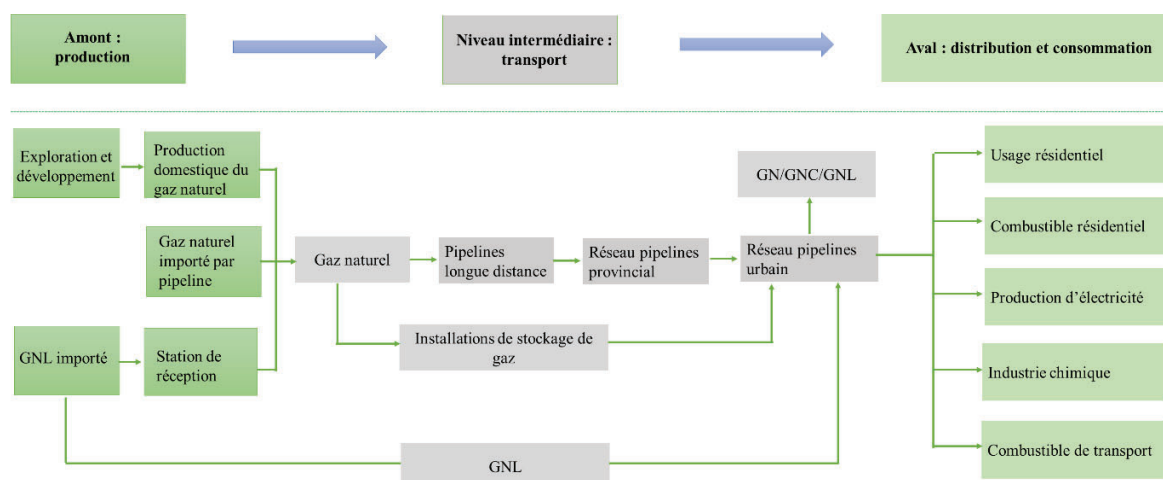


Figure 1 – Relation entre engagement et fidélité
Source : Adapté de Gao et collab. (2022) et de Lv (2022)

En amont

En matière de production et d'approvisionnement, la Chine dispose d'un modèle d'approvisionnement multisource de gaz domestique conventionnel et non conventionnel, de GNL importé et de gazoducs terrestres (Gao et collab., 2022). Les principales zones de production de gaz naturel domestique sont entre autres concentrées dans les provinces du Shaanxi, de la Mongolie-Intérieure, du Xinjiang, du Sichuan et du Qinghai ainsi que dans la ville de Chongqing. Le GNL provient d'un large éventail de sources, mais les principales installations de réception sont concentrées dans les zones côtières orientales. De son côté, les gazoducs terrestres proviennent principalement des pays d'Asie centrale et de Russie.

Le taux de production de gaz domestique s'est accéléré au cours des deux dernières années. La production en 2021 était d'environ $2086 \times 108 \text{ m}^3$, avec un taux de croissance de 8 % (Wang et collab., 2021). L'approvisionnement en gaz de canalisation importé était de $585 \times 108 \text{ m}^3$, avec un taux d'augmentation de près de 23 % (Lv, 2022). Le GNL importé est la principale source de gaz supplémentaire au cours des dernières années. L'offre a atteint $1096 \times 108 \text{ m}^3$ en 2021, avec un taux de croissance de plus de 17 % (Gao et collab., 2022).

La Chine dispose à ce jour d'importantes ressources de gaz naturel, caractérisées par un faible degré d'exploration et de développement. Elle a donc un potentiel de développement intéressant. On estime que les ressources techniques potentielles d'exploitation du gaz conventionnel, du gaz de schiste et du méthane provenant de gisements houillers en Chine sont respectivement d'environ $3,33 \times 10^{13} \text{ m}^3$, $1,285 \times 10^{13} \text{ m}^3$ et $1,25 \times 10^{13} \text{ m}^3$ (Li, 2022; Ma et collab., 2021). À la fin de 2019, le total des réserves techniquement récupérables de gaz conventionnel, de gaz de schiste et de méthane provenant de gisements houillers en Chine était respectivement d'environ $7,69 \times 10^{12} \text{ m}^3$, $4,334 \times 10^{11} \text{ m}^3$ et $3,285 \times 10^{11} \text{ m}^3$, avec un taux de ressources approuvé de 23 %, de 3,4 % et de 2,6 %, donc au stade précoce de l'exploration (Jia et collab., 2021; Li et collab., 2020; Lv, 2022).

Depuis 2000, l'industrie chinoise du gaz naturel a connu un grand développement. Ainsi, 28 grands gisements de gaz avec des réserves géologiques de plus de 100 milliards de mètres cubes ont été découverts sur une courte période. Les réserves géologiques approuvées ont augmenté de plus de $5 \times 10^{11} \text{ m}^3$ pendant 18 années consécutives (Gao et collab., 2022; Li et collab., 2020; Wang et collab., 2018). Il est prévu qu'en fonction des activités d'exploration à venir, la production de gaz naturel de la Chine devrait atteindre $3,0 \times 10^{11} \text{ m}^3$ d'ici 2035, et ce, grâce à l'exploration simultanée des ressources naturelles marines et terrestres (Jia et collab., 2021; Li et collab., 2020; Lv, 2022; Zhu et collab., 2021). L'énorme production et les réserves approuvées constituent la base d'un développement vigoureux de l'industrie du gaz naturel ainsi que de l'atteinte des objectifs de double carbone.

À mi-chemin

Concernant le transport de gaz et de construction d'infrastructures, le kilométrage total des gazoducs longue distance de gaz naturel est de près de 84 000 km (Li et collab., 2020; Zheng, 2022). Actuellement, le réseau de distribution de gaz urbain s'étend sur plus de 1 million de kilomètres et il existe 15 installations de stockage de gaz en service (groupes), formant une capacité d'environ $171 \times 10^8 \text{ m}^3$ (Lv, 2022). Aussi, 22 stations de réception de GNL ont été construites et mises en service, avec une capacité totale de réception de plus de 936 000 tonnes (Zhou et collab., 2022).

Le stockage de gaz est un facteur important de régulation de l'équilibre entre l'offre et la demande de gaz naturel. Il constitue également un maillon essentiel de la chaîne de l'industrie du gaz naturel. Le manque de capacité d'écrêtement (c.-à-d. maintenir à un niveau constant) des pics de stockage de gaz constitue la faiblesse du développement de l'industrie chinoise du gaz naturel (Zheng, 2022; Zhou et collab., 2022). À l'heure actuelle, le ratio de kilométrage des réseaux de pipelines correspondant à la superficie terrestre de la Chine n'est que de 70 km/104 km², soit environ 12 % de celui des États-Unis (Wang, 2022; Zheng, 2022). En 2020, le volume de gaz de travail du stockage souterrain de gaz en Chine était d'environ $144 \times 10^8 \text{ m}^3$, ce qui ne représentait que 4,3 % de la consommation nationale de gaz naturel, bien en deçà de la moyenne mondiale (15 %) (Li, 2022; Lv, 2022).

Les infrastructures pour le gaz naturel constituent une base importante pour le développement rapide de la ressource naturelle. Depuis le début de la construction du projet de transmission de gaz d'ouest en est en 2000, la Chine a construit un réseau d'infrastructures à travers l'est et l'ouest ainsi que le nord et le sud, reliant l'intérieur et l'extérieur. De plus, elle a construit un système de gazoducs domestiques avec l'ouest (la ligne Shaanxi-Beijing), d'autres systèmes de gazoducs nationaux, un réseau de gazoducs avec l'Asie centrale et la Chine-Russie ainsi qu'un réseau transnational avec le Myanmar (Dong et collab., 2017; Gao et collab., 2022; Lv, 2022; Wang et collab., 2021). Dans l'ensemble, le développement des infrastructures pour le gaz naturel a soutenu les importations chinoises de gaz naturel de plus de $1,4 \times 10^{11} \text{ m}^3$ (Jia et collab., 2021; Ma et collab., 2021).

En aval

En matière de consommation de gaz naturel, la Chine a maintenu une croissance rapide au cours des 10 dernières années, passant de $1076 \times 108 \text{ m}^3$ en 2010 à $3654 \times 108 \text{ m}^3$ en 2021, avec un taux de croissance annuel composé moyen de 11,6 % (Gao et collab., 2022; Lv, 2022). La part du gaz naturel dans la consommation d'énergie primaire a également continué d'augmenter, passant de 4,2 % en 2010 à 9 % en 2021 (Gao et collab., 2022; Lv, 2022).

Actuellement, la consommation de gaz dans le domaine des combustibles industriels est d'environ $1451 \times 108 \text{ m}^3$, l'utilisation du gaz urbain de $1164 \times 108 \text{ m}^3$, la production d'électricité de $660 \times 108 \text{ m}^3$ et la production de produits chimiques de $379 \times 108 \text{ m}^3$ (Wang et collab., 2021; Zheng, 2022). La population utilisatrice de gaz dépasse les 900 millions et le taux de gazéification civile urbaine atteint 97,9 % (Lv, 2022). Près de 3 000 entreprises de gaz urbain appartenant à l'État ainsi qu'à des capitaux étrangers, privés et mixtes fournissent des services à des milliers de ménages (Gao et collab., 2022). Cependant, il existe encore de nombreux problèmes sur le marché chinois du gaz naturel, tels que des liaisons d'approvisionnement en gaz naturel excessives, le coût élevé de la distribution de gaz terminal dans certaines régions et l'absence de mécanismes efficaces pour le contrôle des prix.

2.3 Apport potentiel et perspectives de développement de la filière du gaz naturel dans le cadre des objectifs de double carbone

Sous l'effet des contraintes des objectifs de double carbone, le gaz naturel présente des avantages comparatifs évidents dans la production et la consommation d'électricité, dans le domaine du transport ainsi que dans le gisement gazier urbain et le secteur industriel (Li, 2022; Wang et collab., 2021).

2.3.1 La production et la consommation d'électricité

En matière de production, par rapport à l'électricité au charbon, l'électricité au gaz est plus propre, à faible émission de carbone, flexible et efficace. Plus précisément, elle présente des avantages évidents en matière de protection de l'environnement. Les émissions de CO₂ et d'oxyde d'azote pendant le processus de combustion sont inférieures de 44 % et de 50 % à celles du charbon, et il n'y a pas d'émissions de particules de poussière et de dioxyde de soufre (SO₂) (Lv, 2022; Wang et collab., 2018).

De plus, le groupe électrogène à turbine à gaz à écrêtage de pics présente les avantages d'un démarrage et d'un arrêt rapides, d'une vitesse de montée rapide et de bonnes performances de régulation (Khallaghi et collab., 2020; Lv, 2022). Le démarrage à froid d'un groupe électrogène à turbine à charbon prend 5 heures, tandis que le démarrage à pleine charge d'un groupe électrogène à turbine à gaz à écrêtage de pics ne prend que 9 à 10 minutes (Chang et collab., 2015; Xiao et collab., 2016). Les générateurs à turbine à gaz d'écrêtage de pics peuvent non seulement améliorer les problèmes de sécurité du réseau causés par l'accès intermittent et aléatoire aux sources d'énergie renouvelable à grande échelle, mais également résoudre les problèmes de réduction de l'efficacité énergétique et d'augmentation des émissions dans le processus d'écrêtage profond des pics de charbon à grande échelle – des groupes électrogènes à combustion (Chang et collab., 2015; Khallaghi et collab., 2020).

En outre, l'efficacité de la production d'électricité au gaz naturel est supérieure à celle de l'électricité au charbon. Le taux d'utilisation de l'énergie dans la production d'électricité par cogénération peut atteindre 80 %, ce qui est bien supérieur à 30 % des groupes électrogènes ordinaires (Dong et collab., 2017; Xiao et collab., 2016; Zheng, 2022). Avec la promotion continue de la prévention et du contrôle de la pollution de l'air ainsi que la contrainte des objectifs de double carbone, la demande d'énergie d'écrêtage de pics augmente, et la production d'électricité au gaz, principalement des centrales électriques d'écrêtage de pics, devrait connaître un développement similaire.

2.3.2 Le domaine du transport

Le gaz naturel présente des avantages économiques et environnementaux importants dans le domaine du transport. La chaleur de 1 litre d'essence est fondamentalement équivalente à celle de 1 m³ de gaz naturel. Lorsque le prix international du pétrole est de 60 \$/baril, le prix de détail de l'essence domestique est d'environ 1 \$/L, tandis que le prix de remplissage du gaz naturel n'est que de 0,5 à 0,7 \$/m³. Le coût du carburant des véhicules au gaz naturel est de 30 % à 50 % de celui des véhicules à essence (Ma et collab., 2021; Wang, 2022). Par rapport aux véhicules à essence, les émissions de CO, de CO₂ et de composés d'azote et d'oxygène dans les gaz d'échappement des véhicules au gaz naturel sont considérablement réduites. Les particules en suspension, l'oxyde de plomb et d'autres substances nocives peuvent être nuls (Hagos et Ahlgren, 2017; Khan et collab., 2015; Pourahmadiyan et collab., 2021). En outre, les véhicules au gaz naturel présentent les avantages des véhicules électriques dans l'application du transport longue distance de passagers et de marchandises, en particulier dans les zones froides. Ces véhicules peuvent favoriser conjointement la réalisation de la révolution énergétique dans le domaine du transport avec des véhicules électriques (Pourahmadiyan et collab., 2021; Romanyuk et collab., 2018; Thiruvengadam et collab., 2018).

À la fin de 2019, le nombre de véhicules au gaz naturel en Chine a dépassé 7,6 millions, dont plus de 7 millions de véhicules au gaz naturel comprimé (GNC), tels que les taxis et les bus urbains, et 600 000 camions lourds au GNL (Li, 2022; Lv, 2022). Il existe environ 6 000 stations-service de GNC et 3 900 stations-service de GNL, ce qui a permis de construire le plus grand marché mondial de transport de gaz naturel (Gao et collab., 2022; Zhou et collab., 2022). La consommation de gaz naturel dans le secteur du transport est de $3,63 \times 10^{10}$ m³; le remplacement équivalent de la consommation de pétrole raffiné est d'environ $2,96 \times 10^7$ tonnes (Gao et collab., 2022).

À l'heure actuelle, les véhicules au gaz naturel représentent moins de 3 % du nombre total de véhicules à moteur en Chine (Gao et collab., 2022; Zheng, 2022). Avec l'amélioration des infrastructures pour le gaz naturel, motivée par des facteurs économiques et environnementaux, les véhicules au gaz naturel apporteront une contribution significative à la transformation à faible émission de carbone, propre au secteur du transport en Chine.

2.3.3 Le gisement gazier urbain et le secteur industriel

Ces dernières années, avec l'accélération de l'urbanisation ainsi que la promotion des politiques de prévention et de contrôle de la pollution de l'air, la demande urbaine en gaz n'a cessé de croître. On estime que, d'ici 2035, le taux d'urbanisation de la Chine atteindra 72 % (Gao et collab., 2022; Zheng, 2022). Si plus de 70 % de la population urbaine utilise le gaz naturel, la consommation urbaine de gaz naturel devrait doubler (Gao et collab., 2022; Zheng, 2022).

Le gaz naturel est largement utilisé dans le domaine industriel. La Chine encourage le domaine industriel à remplacer le charbon par le gaz et limite le développement de l'industrie chimique du gaz naturel (Gao et collab., 2022; Wang, 2022). Le gaz naturel est principalement utilisé en métallurgie, en céramique, en transformation du verre et des aliments, en impression et en teinture ainsi que dans la fabrication du papier. Il est aussi utilisé dans les chaudières industrielles produisant de la vapeur ou de l'eau chaude pour remplacer le charbon, le gaz de houille et les produits pétroliers (Jia, 2018; Zhou et collab., 2022).

Le gaz naturel est relativement pur, car il contient peu d'impuretés, de sorte qu'il est facile de contrôler sa température et d'assurer la qualité du produit (Mokhatab et collab., 2018; Zou, Yang et collab., 2018). Son stockage et son transport sont pratiques, sans désulfuration ni traitement des déchets, ce qui réduit considérablement les coûts liés à la maintenance des équipements, au personnel, aux véhicules et à la protection de l'environnement (Khan et collab., 2019; Pospíšil et collab., 2019; Thiruvengadam et collab., 2018).

La consommation de gaz naturel industriel a augmenté rapidement en Chine au cours de la deuxième décennie du *xxi*^e siècle (Zhou et collab., 2022). Avec la promotion continue de la politique *coal to gas* et la mise en place de politiques plus strictes de protection de l'environnement, la consommation de gaz naturel dans le domaine des combustibles industriels va progressivement augmenter. Dans le domaine de l'industrie chimique, le gaz naturel est principalement utilisé pour produire des engrais azotés (ammoniac synthétique) et du méthanol, suivis de l'acétylène, de l'acide cyanhydrique, du formaldéhyde, du dichloroéthane, du tétrachlorure de carbone, du disulfure de carbone, du nitrométhane et du noir de carbone, et dans l'extraction de l'hélium (Gao et collab., 2022; Wang, 2022).

2.4 Orientation du développement des technologies de production de gaz naturel dans la réduction du carbone

La Chine possède d'importantes ressources de charbon, soit $1431,97 \times 108$ t à la fin de 2020, ce qui représente 95,6 % des réserves totales d'énergie fossile du pays (Song, 2022). Les caractéristiques de dotation en ressources et le stade de développement économique de la Chine déterminent que le charbon est la principale énergie actuelle et pour une certaine période (Wang, 2022; Zhou et collab., 2022). Le gaz naturel à base de charbon est un processus chimique qui convertit le charbon en gaz naturel avec une densité d'énergie plus élevée, c'est-à-dire que le charbon est gazéifié, dépoussiéré, transformé, désacidifié et décarboné, puis synthétisé chimiquement en gaz naturel synthétique (GNS) propre grâce à la technologie de la méthanisation (Meng et collab., 2022; Tanaka et collab., 2019; Zou et collab., 2019). Le principal produit du gaz naturel à base de charbon est le GNS. Les sous-produits du GNS comprennent le naphtha, le goudron, le phénol brut, le sulfate d'ammonium, le soufre, etc. (Bolt et collab., 2020; Zeng et collab., 2019).

Le passage du charbon au GNS est une des directions importantes de l'utilisation propre du charbon (Bolt et collab., 2020; Song, 2022; Zeng et collab., 2019). Les hydrocarbures, les sulfures et l'oxygène contenus dans le produit sont essentiellement convertis ou absorbés après un processus de purification et de méthanisation; il ne reste qu'une quantité résiduelle de CO₂ et de gaz inertes (Meng et collab., 2022; Song, 2022). La composition du GNS est similaire à celle du gaz naturel traditionnel; il peut donc être transporté et utilisé conjointement avec le gaz naturel traditionnel.

La qualité du GNS peut répondre à la norme nationale de gaz naturel de classe I pour le transport par pipeline (Meng et collab., 2022; Song, 2022). Le développement du marché du charbon en gaz naturel dans le nord-ouest de la Chine, qui est riche en ressources de charbon, et son transport vers le marché national de consommation par gazoduc longue distance ouvrent non seulement une nouvelle voie de production d'énergie propre, mais réduisent également le coût de circulation et la consommation d'énergie ainsi que les émissions polluantes dans le processus de transport, par rapport au transport direct du charbon (Song, 2022; Wang, 2022; Zheng, 2022).

Le développement du marché du gaz naturel à faible émission de CO₂ et à carboneutralité se déploie en outre à l'aide des technologies de réduction des émissions de méthane, du gaz naturel de la biomasse ainsi que du mélange d'hydrogène et de gaz naturel (Babae et Loughlin, 2018; Baik et collab., 2022; Chae et collab., 2022; Xin et collab., 2021). En outre, après une utilisation à grande échelle du gaz naturel, des projets de captage et stockage du carbone (CSC) et de captage, utilisation et stockage du carbone (SUSC) peuvent être mis en œuvre (Adu et collab., 2019; Fragkos, 2021; Zhang et collab., 2022).

Le gaz naturel continuera de jouer un rôle important dans un monde à faible émission de CO₂, voire à carboneutralité, et où la décarbonisation est un enjeu crucial. Pour ce faire, il est nécessaire de promouvoir et d'améliorer les technologies du gaz naturel renouvelable et des sources d'énergie renouvelable (p. ex., le biogaz, le gaz naturel de la biomasse et l'hydrogène), et d'accélérer le développement de l'ensemble de la chaîne industrielle du gaz naturel.

2.5 Enjeux et défis liés à l'exploitation du gaz naturel en Chine

Bien que le gaz naturel soit prometteur pour contribuer aux objectifs de double carbone, l'exploitation de cette ressource naturelle et le développement de son marché en Chine font encore face à certains enjeux et défis.

1. *Les difficultés techniques de l'exploitation à grande échelle*

Bien que la Chine possède d'importantes réserves de gaz naturel, la plupart de ces réserves sont réparties dans la région occidentale du pays. Ces zones comportent des aires désertiques (le plateau de Læss) ainsi que des montagnes. En raison de l'environnement géographique difficile, il existe de nombreux problèmes techniques dans le développement et l'utilisation de ces réserves de gaz naturel. À l'heure actuelle, le niveau scientifique et technologique global de l'exploration et du développement du gaz naturel en Chine ne peut pas répondre aux besoins d'un développement rapide de l'industrie. Par conséquent, la manière de réduire les goulots d'étranglement techniques est un problème urgent pour promouvoir le développement rapide de l'industrie.

2. *Un réseau d'infrastructures encore incomplet*

Bien que les infrastructures pour le gaz naturel en Chine se soient développées rapidement ces dernières années, certaines contradictions structurelles subsistent et limitent dans une large mesure le développement de l'industrie. Cela se traduit principalement par le retard des installations de régulation des pics, par l'insuffisance des capacités de régulation des pics, par l'insuffisance d'interconnexion des gazoducs, etc. À l'heure actuelle, la capacité totale de stockage du gaz naturel de régulation de pics ne représente que 7,2 % de la consommation totale de gaz naturel en Chine, ce qui est bien inférieur au taux à l'international (15 % à 20 %) et entraîne de fréquentes « pénuries de gaz » en hiver dans certaines régions du nord (Wang, 2022). La source de gaz instable peut faire grimper le prix du gaz dans les zones d'approvisionnement non prioritaires, ce qui limite l'utilisation à grande échelle de la ressource. En outre, les réseaux de gazoducs transrégional, provincial longue distance et municipal sont respectivement construits et exploités par la National Petroleum and Natural Gas Pipeline Network Group Co., Ltd., par les compagnies provinciales de gaz naturel et par les entreprises de gazoducs urbains. Les acteurs du marché sont donc diversifiés, mais pas assez interconnectés. Les sources d'approvisionnement direct en gaz des grands utilisateurs industriels urbains sont soumises à de nombreuses contraintes, qui ont des impacts directs sur la sécurité de l'approvisionnement et sur le marché de consommation.

3. *Un système incomplet de surveillance du marché*

L'amélioration du système de gestion et de la réglementation est la garantie fondamentale du développement rapide de l'industrie du gaz naturel. Or, à l'heure actuelle, en raison de l'absence de lois et de réglementations efficaces, la Chine n'a pas encore mis en place un système solide de surveillance du marché du gaz naturel. En particulier, les liens concurrentiels n'ont pas encore abouti à une tarification adaptée au marché. En raison du petit nombre de plateformes de négociation et de la faible efficacité opérationnelle, il est difficile de remplacer le prix de référence du gouvernement comme nouveau prix de référence à court terme. Cela entrave sérieusement le commerce et la concurrence, le développement de l'industrie et la répartition raisonnable des ressources en gaz naturel.

Conclusion et recommandations

Sur la base des caractéristiques de la chaîne de l'industrie du gaz naturel en Chine, cet article analyse le rôle et les avantages du gaz naturel dans l'atteinte des objectifs de double carbone du pays. Il montre que le gaz naturel a un grand potentiel et des perspectives de développement pour contribuer à ces objectifs. En particulier, le secteur du transport, l'électricité ainsi que les usages urbains et industriels sont les axes clés du développement futur du gaz naturel sur le territoire chinois.

Cependant, l'exploitation du gaz naturel et le développement de son marché en Chine font toujours face à certains défis et problèmes : des difficultés techniques dans l'exploitation à grande échelle, un réseau d'infrastructures incomplet et une certaine défaillance du système de surveillance du marché. Les autorités, les entreprises et le public devront notamment déployer des efforts concertés pour promouvoir le développement efficace, de haute qualité et rapide de l'ensemble de la chaîne de l'industrie du gaz naturel, et ce, afin de promouvoir la mise en œuvre de la stratégie chinoise de transition énergétique et de réduction des émissions de carbone.

Afin de faciliter un développement rapide de l'industrie, l'investissement de diverses ressources devrait être constamment augmenté pour réduire le goulot d'étranglement technique de l'exploitation de la ressource naturelle. De plus, le marché chinois de l'approvisionnement en énergie sera encore dominé par le charbon pendant une certaine période. L'exploitation et l'importation de gaz naturel de même que la transformation du charbon en gaz naturel apparaissent comme des solutions opportunes dans le cheminement vers une économie chinoise à faible émission de carbone. Par conséquent, dans ses futurs plans quinquennaux (qui ont commencé en 1953), le gouvernement devrait favoriser l'exploration et l'exploitation du gaz domestique, soutenir la production d'électricité par GNS, puis combler les manques avec l'importation.

Les entreprises devraient accélérer les progrès de la construction d'installations de stockage de gaz, de gazoducs longue distance et de projets clés de réseaux de distribution urbains; améliorer l'efficacité de l'allocation des ressources; et cultiver la compétitivité du marché. En outre, elles devraient tirer parti de leurs propres avantages pour accumuler de la technologie, accélérer les percées dans les technologies de base et élargir en permanence le champ d'application du gaz naturel.

Compte tenu des réalités politiques et sociales propres à la Chine, les autorités devraient promouvoir activement et régulièrement la réforme du mécanisme de formation des prix du gaz naturel afin d'élargir le marché de la consommation de la ressource. Un mécanisme régulier d'ajustement des prix devrait être mis en place sur la base du maintien des avantages évidents des prix du gaz des terminaux et des prix des autres énergies alternatives.

Aussi, compte tenu du problème de résolution des subventions croisées des différents types d'utilisateurs de gaz naturel, le gaz naturel civil devrait promouvoir le mécanisme de tarification par étapes en temps opportun, complété par des différences de prix saisonnières, tandis que l'utilisation industrielle et la production d'électricité devraient fournir un approvisionnement direct en une gamme plus large.

Il convient ainsi d'exploiter pleinement les atouts régionaux, de mettre en valeur la position dominante du gaz naturel dans les domaines de la cuisson et du chauffage des ménages, ou encore de privilégier le développement du marché du gaz urbain. En outre, afin d'augmenter continuellement la proportion d'applications de GNC et de GNL dans le domaine du transport, les infrastructures de soutien connexes et les stratégies de subventions diversifiées devraient être améliorées de manière opportune et efficace.

En ce qui concerne le public, le concept, le mode et la structure de consommation devraient être transformés de façon à être plus propres et à faible émission de carbone. Cet ajustement permettrait une consommation scientifique d'énergie dans l'ensemble de la société et, ainsi, améliorerait l'efficacité de l'utilisation de l'énergie.

RÉFÉRENCES

- Adu, E., Zhang, Y. et Liu, D. (2019). Current situation of carbon dioxide capture, storage, and enhanced oil recovery in the oil and gas industry. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 97(5), 1048-1076. <https://doi.org/10.1002/cjce.23393>
- Babae, S. et Loughlin, D. H. (2018). Exploring the role of natural gas power plants with carbon capture and storage as a bridge to a low-carbon future. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20(2), 379-391. <https://doi.org/10.1007/s10098-017-1479-x>
- Baik, E., Siala, K., Hamacher, T. et Benson, S. M. (2022). California's approach to decarbonizing the electricity sector and the role of dispatchable, low-carbon technologies. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 113, 103527. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2021.103527>
- Belz, F.-M. et Peattie, K. (2009). *Sustainability marketing: A global perspective*. Wiley & Sons.
- Beylot, A., Guyonnet, D., Muller, S., Vaxelaire, S. et Villeneuve, J. (2019). Mineral raw material requirements and associated climate-change impacts of the French energy transition by 2050. *Journal of Cleaner Production*, 208, 1198-1205. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.154>
- Bolt, A., Dincer, I. et Agelin-Chaab, M. (2020). A critical review of synthetic natural gas production techniques and technologies. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 84, 103670. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103670>
- Boretti, A., Lappas, P., Zhang, B. et Mazlan, S. K. (2013). *CNG fueling strategies for commercial vehicles engines: A literature review* [Technical Paper No. 2013-01-2812]. SAE. <https://doi.org/10.4271/2013-01-2812>
- Chae, M. J., Kim, J. H., Moon, B., Park, S. et Lee, Y. S. (2022). The present condition and outlook for hydrogen-natural gas blending technology. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 39, 251-262. <https://doi.org/10.1007/s11814-021-0960-8>
- Chang, Y., Huang, R., Ries, R. J. et Masanet, E. (2015). Life-cycle comparison of greenhouse gas emissions and water consumption for coal and shale gas fired power generation in China. *Energy*, 86, 335-343. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.04.034>
- Dong, X., Pi, G., Ma, Z. et Dong, C. (2017). The reform of the natural gas industry in the PR of China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 582-593. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.157>
- Dyatlov, S. A., Didenko, N. I., Ivanova, E. A., Soshneva, E. B. et Kulik, S. V. (2020). Prospects for alternative energy sources in global energy sector. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 434(1), 12014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/434/1/012014>
- Economides, M. J. et Wood, D. A. (2009). The state of natural gas. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 1(1-2), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2009.03.005>
- Éminov, A. A., Kadyrova, Z. R. et Iskandarova, M. (2021). Gas processing waste: Promising raw material for designing the composition of ceramic grinding bodies. *Glass and Ceramics*, 78(1), 35-39. <https://doi.org/10.1007/s10717-021-00344-6>
- Ertz, M. (2021). *Marketing responsable*. Éditions JFD.
- Faramawy, S., Zaki, T. et Sakr, A. A.-E. (2016). Natural gas origin, composition, and processing: A review. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 34, 34-54. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.06.030>
- Farhad, S., Younessi-Sinaki, M., Golriz, M. R. et Hamdullahpur, F. (2008). Exergy analysis and performance evaluation of CNG to LNG converting process. *International Journal of Exergy*, 5(2), 164-176. <http://dx.doi.org/10.1504/IJEX.2008.016673>
- Fragkos, P. (2021). Assessing the role of carbon capture and storage in mitigation pathways of developing economies. *Energies*, 14(7), 1879. <https://doi.org/10.3390/en14071879>
- Gao, J., Zhao, Z., Zhang, J. et Zhao, H. (2022). Review and prospect of natural gas industry development in 2021. *Oil & Gas & New Energy*, 34(3), 36-40.
- Hagos, D. A. et Ahlgren, E. (2017). *A state-of-the art review on the development of CNG/LNG infrastructure and natural gas vehicles (NGVs)* [Technical report]. Chalmers University of Technology. https://futuregas.dk/wp-content/uploads/2018/08/FutureGas-WP3-Deliverable_Task-3.1.1_Review-natural-gas-vehicles_Final-002.pdf
- He, T., Chong, Z. R., Zheng, J., Ju, Y. et Linga, P. (2019). LNG cold energy utilization: Prospects and challenges. *Energy*, 170, 557-568. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.170>
- Ikealumba, W. C. et Wu, H. (2014). Some recent advances in liquefied natural gas (LNG) production, spill, dispersion, and safety. *Energy & Fuels*, 28(6), 3556-3586. <https://doi.org/10.1021/ef500626u>
- Index Mundi. (s. d.). *Comparaison de pays : gaz naturel – consommation*. <https://www.indexmundi.com/g/r.aspx?v=137&l=fr>
- Jia, A. (2018). Progress and prospects of natural gas development technologies in China. *Natural Gas Industry B*, 5(6), 547-557. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2018.11.002>

- Jia, A., He, D., Wei, Y. et Li, Y. (2021). Predictions on natural gas development trend in China for the next fifteen years. *Journal of Natural Gas Geoscience*, 6(2), 67-78. <https://doi.org/10.1016/j.jnggs.2021.04.005>
- Kanbur, B. B., Xiang, L., Dubey, S., Choo, F. H. et Duan, F. (2017). Cold utilization systems of LNG: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 1171-1188. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.161>
- Khallaghi, N., Hanak, D. P. et Manovic, V. (2020). Techno-economic evaluation of near-zero CO₂ emission gas-fired power generation technologies: A review. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 74, 103095.
- Khan, N., Dilshad, S., Khalid, R., Kalair, A. R. et Abas, N. (2019). Review of energy storage and transportation of energy. *Energy Storage*, 1(3), e49. <https://doi.org/10.1002/est2.49>
- Khan, M. I., Yasmin, T. et Shakoor, A. (2015). Technical overview of compressed natural gas (CNG) as a transportation fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 785-797. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.053>
- Levi, M. (2013). Climate consequences of natural gas as a bridge fuel. *Climatic Change*, 118(3), 609-623. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0658-3>
- Li, J. (2022). Consideration on the development situation of natural gas under the “dual carbon” target. *Natural Gas Technology and Economics*, 16(01), 53-59.
- Li, J., She, Y., Gao, Y., Li, M., Yang, G. et Shi, Y. (2020). Natural gas industry in China: Development situation and prospect. *Natural Gas Industry B*, 7(6), 604-613. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2020.04.003>
- Litvinenko, V. (2020). The role of hydrocarbons in the global energy agenda: The focus on liquefied natural gas. *Resources*, 9(5), 59. <https://doi.org/10.3390/resources9050059>
- Lopatin, O. P. (2020). Natural gas combustion in diesel engine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 421(7), 72019. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/421/7/072019/pdf>
- Luque, P., Mántaras, D. A. et Sanchez, L. (2021). Artificial intelligence applied to evaluate emissions and energy consumption in commuter railways: Comparison of liquefied natural gas as an alternative fuel to diesel. *Sustainability*, 13(13), 7112. <https://doi.org/10.3390/su13137112>
- Lv, M. (2022). The road to high quality of natural gas industry under the “dual carbon” target. *Energy*, 06, 68-71.
- Ma, Y., Yang, Z. et Wang, Y. (2021). Development prospect and enlightenment of natural gas industry under energy transition. *Petroleum & Petrochemical Green and Low-Carbon*, 6(06), 1-4.
- Makogon, Y. F. (2010). Natural gas hydrates: A promising source of energy. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2(1), 49-59. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2009.12.004>
- Mena-Carrasco, M., Oliva, E., Saide, P., Spak, S. N., de la Maza, C., Osses, M., Tolvett, S., Campbell, J. E., Tsao, T. et Molina, L. T. (2012). Estimating the health benefits from natural gas use in transport and heating in Santiago, Chile. *Science of The Total Environment*, 429, 257-265. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.04.037>
- Meng, H., Shen, Y., Fang, Y. et Zhu, Y. (2022). Impact of the “coal-to-natural gas” policy on criteria air pollutants in Northern China. *Atmosphere*, 13(6), 945. <https://doi.org/10.3390/atmos13060945>
- Mokhatab, S., Poe, W. A. et Mak, J. Y. (2018). *Handbook of natural gas transmission and processing: Principles and practices*. Gulf Professional Publishing.
- Moore, C. W., Zielinska, B., Petron, G. et Jackson, R. B. (2014). Air impacts of increased natural gas acquisition, processing, and use: A critical review. *Environmental Science & Technology*, 48(15), 8349-8359. <https://doi.org/10.1021/es4053472>
- Ortega, A., Gkoumas, K., Tsakalidis, A. et Pekár, F. (2021). Low-emission alternative energy for transport in the EU: State of play of research and innovation. *Energies*, 14(22), 7764. <https://doi.org/10.3390/en14227764>
- Pospíšil, J., Charvát, P., Arsenyeva, O., Klimeš, L., Špiláček, M. et Klemeš, J. J. (2019). Energy demand of liquefaction and regasification of natural gas and the potential of LNG for operative thermal energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 99, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.027>
- Pourahmadiyan, A., Ahmadi, P. et Kjeang, E. (2021). Dynamic simulation and life cycle greenhouse gas impact assessment of CNG, LNG, and diesel-powered transit buses in British Columbia, Canada. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 92, 102724. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102724>
- Romanyuk, V., Likhonov, V. A. et Lopatin, O. P. (2018). Reducing the environmental threat of motor vehicles by converting engines for operating on natural gas. *Theoretical and Applied Ecology*, 3, 27-32. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2018-3-027-032>
- Safari, A., Das, N., Langhelle, O., Roy, J. et Assadi, M. (2019). Natural gas: A transition fuel for sustainable energy system transformation? *Energy Science & Engineering*, 7(4), 1075-1094. <https://doi.org/10.1002/ese3.380>

-
- Sha, D., Pan, B. et Sun, Y. (2020). A novel raw material for geopolymers: Coal-based synthetic natural gas slag. *Journal of Cleaner Production*, 262, 121238. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121238>
- Singhal, S., Agarwal, S., Arora, S., Sharma, P. et Singhal, N. (2017). Upgrading techniques for transformation of biogas to bio-CNG: A review. *International Journal of Energy Research*, 41(12), 1657-1669. <https://doi.org/10.1002/er.3719>
- Snowdon, L. R. (2001). Natural gas composition in a geological environment and the implications for the processes of generation and preservation. *Organic Geochemistry*, 32(7), 913-931. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(01\)00051-1](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(01)00051-1)
- Song, P. (2022). Thinking on the synergistic development path of coal-to-natural gas, LNG industry and renewable energy under the background of “dual carbon.” *Petroleum & New Energy*, 34(2), 88-93. <https://doi.org/10.3390/ijerph19159483>
- Sun, S. et Ertz, M. (2020). Life cycle assessment and Monte Carlo simulation to evaluate the environmental impact of promoting LNG vehicles. *MethodsX*, 7, 101046. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.101046>
- Sun, S. et Ertz, M. (2022). Life cycle assessment and risk assessment of liquefied natural gas vehicles promotion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 153, 111769. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111769>
- Tanaka, K., Cavalett, O., Collins, W. J. et Cherubini, F. (2019). Asserting the climate benefits of the coal-to-gas shift across temporal and spatial scales. *Nature Climate Change*, 9(5), 389-396. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0457-1>
- Thiruvengadam, A., Besch, M., Padmanaban, V., Pradhan, S. et Demirgok, B. (2018). Natural gas vehicles in heavy-duty transportation: A review. *Energy Policy*, 122, 253-259. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.07.052>
- Université de Calgary. (s. d.). Combustible fossile. Dans *Encyclopédie Énergie*. https://energyeducation.ca/Encyclopedie_Energie/index.php/Combustible_fossile
- Wang, Q. (2022). Under the new situation of China natural gas industry development and reform thinking. *China Market*, 17, 64-66. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2021.08.021>
- Wang, Z., Kong, Y. et Li, W. (2021). Review on the development of natural gas industry in China under the background of carbon neutrality. *Natural Gas Industry*, 41(08), 194-202. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2021.08.021>
- Wang, Z., Luo, D. et Liu, L. (2018). Natural gas utilization in China: Development trends and prospects. *Energy Reports*, 4, 351-356. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2018.05.005>
- Xiao, B., Niu, D. et Guo, X. (2016). Can natural gas-fired power generation break through the dilemma in China? A system dynamics analysis. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1191-1204. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.198>
- Xin, Y., Wang, K., Zhang, Y., Zeng, F., He, X., Takyi, S. A. et Tontiwachwuthikul, P. (2021). Numerical simulation of combustion of natural gas mixed with hydrogen in gas boilers. *Energies*, 14(21), 6883. <https://EconPapers.repec.org/RePEc:gam:jeners:v:14:y:2021:i:21:p:6883-d:661011>
- Zeng, S., Gu, J., Yang, S., Zhou, H. et Qian, Y. (2019). Comparison of techno-economic performance and environmental impacts between shale gas and coal-based synthetic natural gas (SNG) in China. *Journal of Cleaner Production*, 215, 544-556. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.101>
- Zhang, J., Meerman, H., Benders, R. et Faaij, A. (2022). Potential role of natural gas infrastructure in China to supply low-carbon gases during 2020-2050. *Applied Energy*, 306, 117989. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117989>
- Zheng, X. (2022). Thinking on the development of high quality natural gas industry towards the “post-carbon economy era”. *Petroleum Science and Technology Forum*, 41(1), 100-107.
- Zhou, S., Zhu, J., Shan, T., Fu, Q., Zhang, D. et Wang, J. (2022). Development status and prospect of natural gas and LNG industry in China. *China Offshore Oil and Gas*, 34(01), 1-8.
- Zhu, Y., Wang, P., Pang, S., Zhang, S. et Xiao, R. (2021). A review of the resource and test production of natural gas hydrates in China. *Energy & Fuels*, 35(11), 9137-9150. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c00485>
- Zou, C., Chen, Y., Kong, L., Sun, F., Chen, S. et Dong, Z. (2019). Underground coal gasification and its strategic significance to the development of natural gas industry in China. *Petroleum Exploration and Development*, 46(2), 205-215. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(19\)60002-9](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(19)60002-9)
- Zou, C., Yang, Z., He, D., Wei, Y., Li, J., Jia, J., Chen, J., Zhao, Q., Li, Y., Li, J. et Yang, S. (2018). Theory, technology and prospects of conventional and unconventional natural gas. *Petroleum Exploration and Development*, 45(4), 604-618. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(18\)30066-1](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(18)30066-1)
- Zou, C., Zhao, Q., Chen, J., Li, J., Yang, Z., Sun, Q., Lu, J. et Zhang, G. (2018). Natural gas in China: Development trend and strategic forecast. *Natural Gas Industry B*, 5(4), 380-390. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2018.04.010>
- Zycher, B. (2019). *The trouble with “renewable” energy*. American Enterprise Institute. <https://www.aei.org/articles/the-trouble-with-renewable-energy>