



Commission économique pour l'Europe

Comité de l'énergie durable

**Groupe d'experts des systèmes de production
moins polluante d'électricité****Dix-septième session**

Genève, 6-8 octobre 2021

Point 4 de l'ordre du jour provisoire

**Table ronde sur l'association de technologies et l'innovation
technologique : potentiel de l'hydrogène dans la région
de la Commission économique pour l'Europe****Possibilités de développement et de déploiement de systèmes
de gazéification du charbon pour la production d'électricité
et la production combinée de chaleur et d'électricité à l'aide
de piles à combustible et pour la production de produits
chimiques et de produits spécialisés****Note du M. Andrew Minchener, Directeur général du Clean Coal
Centre de l'AIE et Vice-Président du Bureau du Groupe d'experts
des systèmes de production moins polluante d'électricité****I. Introduction**

1. La gazéification est un processus technologique qui permet de convertir toute matière première à base de carbone, comme le charbon, la biomasse et les déchets organiques, en gaz combustible, également appelé gaz de synthèse (netl, 2021). La gazéification a généralement lieu dans un équipement sous pression à haute température où l'oxygène (ou l'air) et la vapeur sont directement mis en contact avec le charbon ou un autre matériau d'alimentation, ce qui entraîne la formation d'un gaz de synthèse et de résidus de cendres/scories. Le gaz de synthèse comprend principalement du monoxyde de carbone (CO) et de l'hydrogène (H₂), ainsi que de petites quantités de méthane et de vapeur d'eau qui peuvent être éliminées. Le mélange CO/H₂ peut être utilisé directement pour diverses applications ou avec de la vapeur d'eau et un catalyseur pour provoquer une réaction du gaz à l'eau dans un réacteur et produire de l'hydrogène et du dioxyde de carbone (CO₂). Ces deux produits peuvent être facilement séparés pour produire des flux gazeux concentrés, source précieuse d'énergie non polluante, et un gaz à haute teneur en carbone qui peut être utilisé dans divers processus ou stocké dans des formations géologiques.

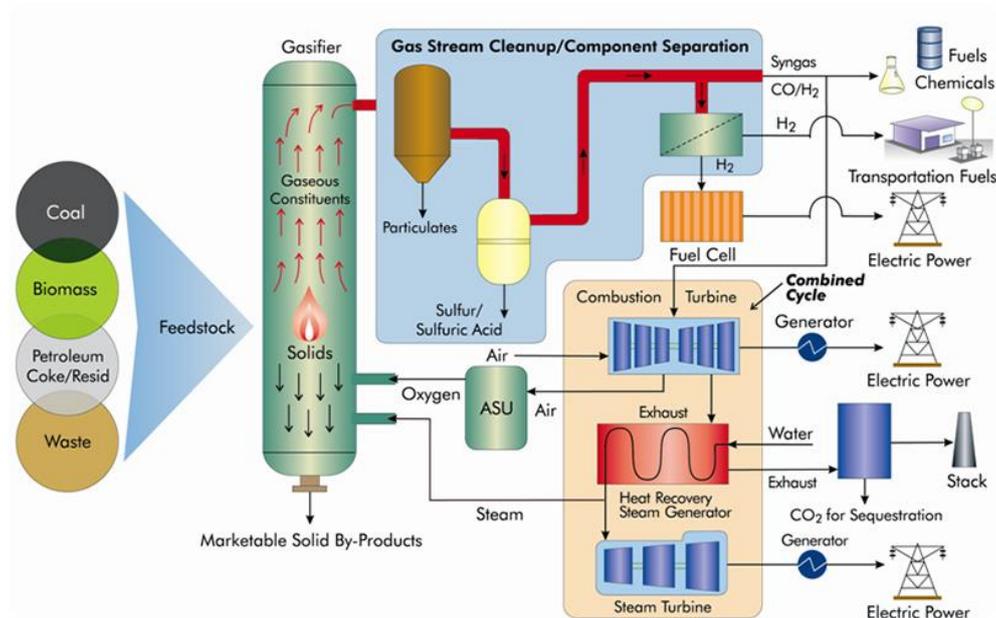
2. Le gaz de synthèse initial ou l'hydrogène (produit final) peuvent être utilisés pour la production d'électricité, la production combinée de chaleur et d'électricité et la production d'une large gamme de produits tels que les engrais et l'ammoniac, ainsi que l'essence et le gazole. Dans une même usine, il est possible de fabriquer une gamme de ces produits et de



produire de l'électricité. Il s'agit de la polygénération, qui est possible uniquement avec des techniques de gazéification. La figure I donne une représentation conceptuelle d'un procédé de gazéification du charbon et décrit à la fois la flexibilité des matières premières inhérente à la gazéification, ainsi que le large éventail de produits obtenus et l'utilité des technologies de gazéification.

Figure I

Possibilités de gazéification pour la production d'électricité et de produits (netl.doe, 2021)



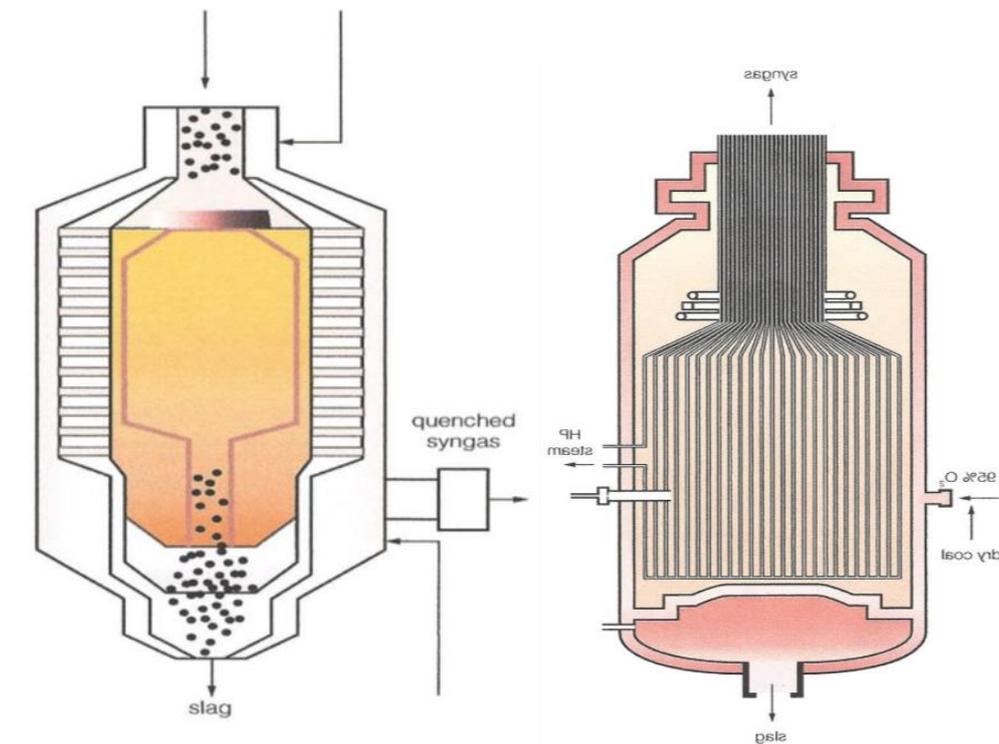
II. Cycle combiné à gazéification intégrée pour la production d'électricité et la production combinée de chaleur et d'électricité : développement technologique et état d'avancement du déploiement

A. Applications industrielles

3. Dans un cycle combiné à gazéification intégrée (CCGI), la matière première carbonée est gazéifiée et le gaz de synthèse produit (constitué principalement de CO et de H₂) est purifié pour éliminer les polluants et les particules gazeux. Le produit est ensuite brûlé pour entraîner une turbine à gaz. La chaleur récupérée des gaz d'échappement de la turbine à gaz peut servir à produire de la vapeur et à entraîner des turbines à vapeur qui produisent de l'électricité supplémentaire (fig. II). Il est également possible d'utiliser la chaleur de qualité inférieure pour le chauffage industriel et domestique, bien que cela nécessite une infrastructure considérable pour acheminer l'eau chaude vers les usines et les immeubles d'habitation.

Figure III

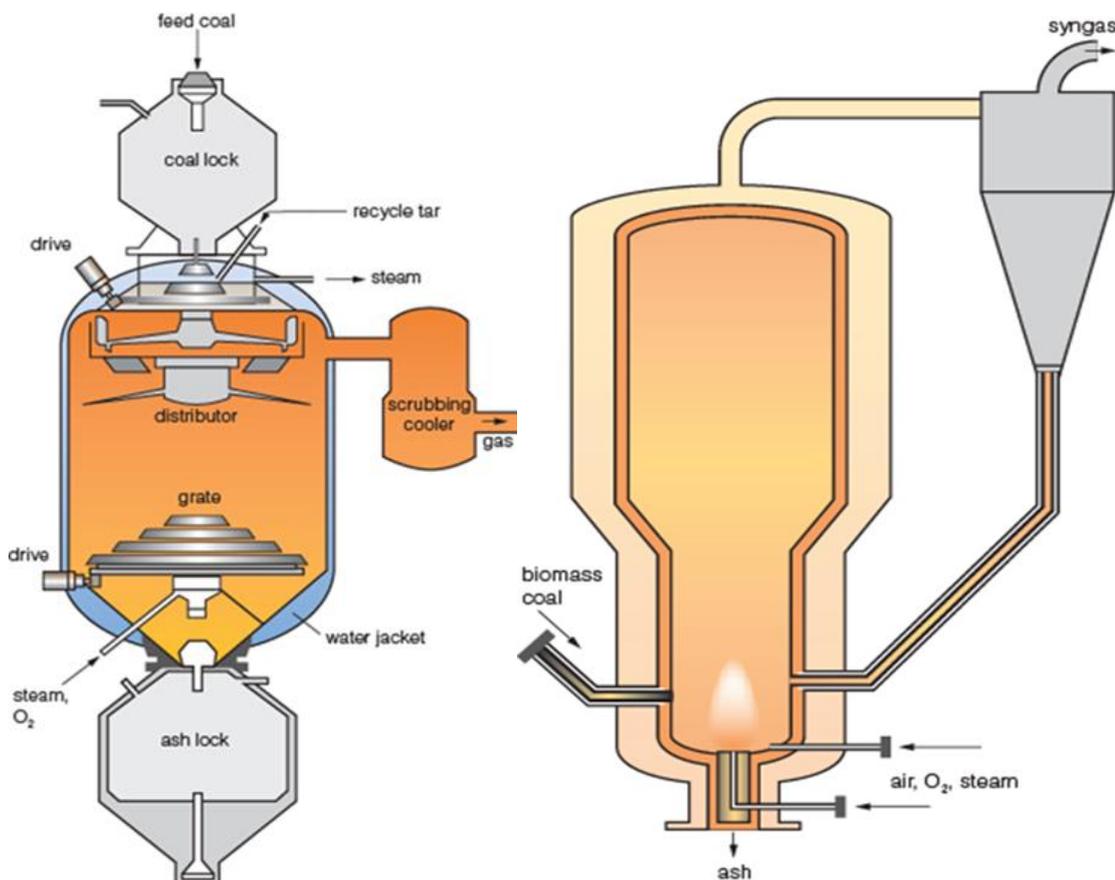
Exemples d'un gazéificateur à flux entraîné à alimentation sèche Shell et d'un gazéificateur à flux entraîné à alimentation en boue GE (netl, 2013b)



7. Les gazéificateurs à flux entraîné peuvent servir à gazéifier tous les types de charbon, quelles que soient leur qualité, leurs caractéristiques d'agglomération et la proportion de fines, bien que les matières premières à faible teneur en cendres soient préférables pour obtenir un rendement élevé à un coût d'investissement acceptable. La viscosité des scories doit être suffisamment faible pour leur permettre de s'écouler le long des parois du gazéificateur. Le temps de séjour n'est que de quelques secondes, ce qui permet une capacité de charge élevée mais exige que le charbon soit pulvérisé en morceaux inférieurs à 0,1 mm. Les réacteurs fonctionnent à une température uniformément élevée pour garantir une conversion élevée du carbone et produire un gaz de synthèse exempt de goudrons et de phénols. Les besoins en oxydants sont relativement importants et le gaz brut contient une grande quantité de chaleur sensible. Les températures de fonctionnement élevées ont un impact sur la durée de vie des brûleurs et des produits réfractaires, et nécessitent l'utilisation de matériaux de construction coûteux ainsi que le recours à des échangeurs thermiques perfectionnés fonctionnant à haute température pour refroidir le gaz de synthèse.

8. Une autre variante est le gazéificateur à lit mobile, dans lequel du charbon en morceaux est introduit par le haut de l'unité tandis que l'oxygène et la vapeur sont introduits par le bas. Les gaz circulent vers le haut à travers le lit de charbon et les cendres, sèches ou sous forme de scories, sont retirées par le bas. Il existe deux variantes technologiques, à savoir le système à fond sec Lurgi-Sasol et le système à scorification British Gas/Lurgi.

Figure IV
Schéma du gazéificateur à fond sec Lurgi-Sasol et d'un gazéificateur à lit fluidisé U Gas (netl, 2013a et 2013c)



9. Le gazéificateur à fond sec Sasol-Lurgi est constitué d'un équipement sous pression à double paroi, fonctionnant à 3MPa, dans lequel l'espace entre les parois est rempli d'eau bouillante (fig. IV). Cela permet un refroidissement intensif des parois tout en générant de la vapeur. L'oxygène et la vapeur entrent dans le réacteur par la base et sont répartis sur le lit par une grille, tandis que le charbon en morceaux est introduit par le haut. Le charbon ne doit pas être aggloméré et sa taille doit être comprise entre 5 et 50 mm, afin que les oxydants puissent circuler librement dans le réacteur. Dans le gazéificateur, le ratio vapeur/oxygène est élevé, ce qui permet de maintenir la température de la zone de combustion à environ 1 000 °C, c'est-à-dire en dessous de la température de fusion des cendres. Le niveau élevé de vapeur produit un ratio H₂/CO élevé dans le gaz de synthèse. En raison de la température plus basse, le procédé est plus adapté aux charbons réactifs. Les gaz sortant de la zone de gazéification entrent dans les zones supérieures du réacteur où le charbon entrant est séché, préchauffé et dévolatilisé. Dans ce procédé, le gaz de synthèse est refroidi, passant d'environ 800 °C à environ 550 °C à la sortie du réacteur. Les cendres sont retirées dans une grille tournante et dépressurisées dans une autre trémie à verrouillage. Elles sont refroidies par l'oxygène et la vapeur entrants (300 °C à 400 °C). Les températures de sortie relativement basses entraînent des concentrations relativement élevées de méthane, de goudrons et de phénols dans le gaz de synthèse sortant. Il est nécessaire de tremper la sortie du réacteur pour éliminer les hydrocarbures et les poussières indésirables. La liqueur résultant de la trempe est d'abord traitée au moyen d'une séparation mécanique des goudrons, suivie d'un processus d'extraction permettant de récupérer le phénol brut. Les gaz acides et l'ammoniac sont ensuite éliminés de manière sélective.

10. La technologie British Gas/Lurgi (BGL) correspond à une version à scorification du gazéificateur Lurgi qui convient au charbon à faible point de fusion des cendres tout en étant capable d'accepter du charbon en gros morceaux et du charbon fin. Par rapport au gazéificateur Lurgi, le gazéificateur BGL a un rendement en CO plus élevé et un débit plus fort au niveau du réacteur. Le rendement est plus élevé s'agissant de la conversion du charbon

en gaz de synthèse et la consommation de vapeur est plus faible. Les matières minérales sont éliminées sous forme de solides vitreux non lixiviables (Collot, 2002). Aucune cendre volante n'est produite et les scories sont des frites vitreuses denses et non lixiviables, qui encapsulent les éléments traces et conviennent comme matériaux de construction. Contrairement à un gazéificateur à flux entraîné, le gazéificateur BGL ne produit pas de vapeur à haute pression car la chaleur est essentiellement récupérée entre le gaz produit et le lit de charbon. Ce procédé convient donc à la production de gaz de synthèse destiné à la fabrication de produits chimiques, puisque la vapeur n'est pas nécessaire.

11. On peut aussi utiliser un gazéificateur à lit fluidisé (fig. IV) circulant ou bouillonnant, procédé dans lequel le combustible est gazéifié dans un lit de particules chaudes non combustibles en suspension dans un flux ascendant de gaz de fluidisation. Selon l'application, le lit comprend un mélange de sable, de coke, de charbon, d'absorbants ou de cendres. Le charbon broyé, d'une taille comprise entre 0,5 et 5 mm, entre par le côté du réacteur tandis que la vapeur et l'air ou l'oxygène entrent principalement par le fond et fluidisent le lit. Le temps de séjour de la charge d'alimentation dans le gazéificateur est généralement compris entre 10 et 100 secondes. Des niveaux élevés de mélange à contre-courant assurent une distribution uniforme de la température dans le gazéificateur. Ce type de gazéificateur fonctionne à des températures inférieures aux températures de fusion des cendres (900 °C à 1 050 °C), afin d'éviter la fusion des cendres, la formation de laitier et la perte de fluidité du lit. Le système est fondé sur de l'air. Les basses températures de fonctionnement peuvent entraîner une gazéification incomplète et les résidus de carbonisation (particules) entraînés dans le gaz brut sortant du gazéificateur sont généralement récupérés par un cyclone et recyclés dans le gazéificateur. Ces températures de fonctionnement signifient également que les gazéificateurs à lit fluidisé sont les plus adaptés aux combustibles relativement réactifs tels que le lignite et la biomasse. La taille des particules est également importante. Si le matériau est trop fin, il sera entraîné dans le gaz de synthèse et quittera le lit alors qu'il devrait être partiellement capté dans les cyclones et renvoyé. La quantité de résidus de carbonisation évacués du lit du gazéificateur et le carbone contenu dans la poussière de filtrage s'échappant du gazéificateur et du cyclone influent sur la limite supérieure de la conversion du carbone.

12. De nombreux facteurs ont un impact sur le fonctionnement des gazéificateurs à lit fluidisé, notamment les propriétés du charbon, en particulier la réactivité des résidus de carbonisation qui doit être suffisamment élevée. La diminution rapide de la réactivité de ces résidus au fur et à mesure de la gazéification constitue un problème de taille qui doit être résolu pour améliorer la conversion du carbone dans les gazéificateurs. Par conséquent, les charbons réactifs tels que le charbon brun, le lignite, le charbon subbitumineux et, dans une certaine mesure, le charbon bitumineux à haute volatilité sont généralement recommandés pour les gazéificateurs à lit fluidisé. La matière minérale contenue dans le charbon constitue un élément majeur du matériau du lit et les caractéristiques des cendres de charbon peuvent donc avoir une incidence sur le fonctionnement du gazéificateur.

C. Situation au regard du cycle combiné à gazéification intégrée (CCGI)

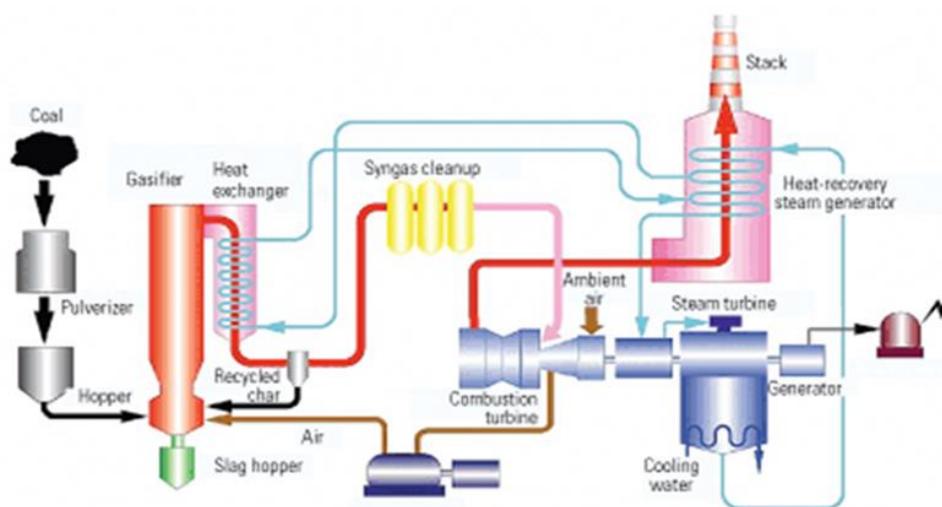
13. Jusqu'à présent, les centrales électriques recourant à la gazéification du charbon qui ont été déployées sont très peu nombreuses, ce qui témoigne en partie de la frilosité du secteur de l'électricité et de la crainte que les premières unités de ce type entraînent des coûts supplémentaires qui les rendront moins attrayantes que les unités modernes de combustion du charbon. De 1994 à 2016 ont été établies sept unités de démonstration à l'échelle commerciale (Buggenum, Pays-Bas ; Wabash River, États-Unis ; Polk Power, États-Unis ; Puertollano, Espagne ; Nakoso, Japon ; Coolgen, Japon ; Huaneng, Chine), une unité pilote industrielle (EAGLE, Japon), une unité modernisée (Vresova, République tchèque) et une unité commerciale (Edwardsport, États-Unis).

14. Par la suite, l'unité de 250 MWe de Nakoso a été totalement mise en service au niveau commercial tandis que deux centrales de plus grande échelle, représentant chacune 540 MWe et inspirées du modèle de Nakoso, sont en cours de construction.

15. Ces unités de démonstration se caractérisaient par diverses technologies de gazéification fondées sur l’oxygène ou l’air, une série de techniques de contrôle environnemental et des systèmes de turbines à gaz, avec différents niveaux d’intégration des systèmes. Dans toutes les unités, à l’exception des plus récentes (Nakoso, Edwardsport et Huaneng), divers problèmes techniques ont dû être résolus pour obtenir une fiabilité acceptable et le taux de disponibilité opérationnelle connexe. En résumé, les centrales électriques alimentées au charbon reposant sur la gazéification présentent des configurations opérationnelles complexes. Ainsi, des degrés d’intégration plus élevés favorisent un meilleur rendement thermique. Ces modèles nécessitent cependant de longs délais de démarrage, car les différents processus doivent devenir opérationnels dans le bon ordre et on observe une certaine perte de flexibilité par rapport à des modèles moins intégrés et moins efficaces. Une intégration partielle est privilégiée pour les futurs modèles car elle permet une mise en route plus rapide et une plus grande souplesse d’exploitation, tout en conservant l’avantage que représente l’efficacité de l’extraction d’air dans les turbines à gaz.

Figure V

Centrale de démonstration du cycle combiné à gazéification intégrée (CCGI) de 250 MWe de Nakoso (Mitsubishi Power, 2021)



III. Gazéification pour les applications de production combinée de chaleur et d’électricité

Contexte

16. Dans de nombreux pays en voie d’industrialisation, le moyen traditionnel de chauffer les habitations, généralement des immeubles élevés, et les locaux industriels consistait à utiliser la chaleur résiduelle d’une centrale électrique alimentée au charbon. Ce procédé a nécessité la construction d’une infrastructure d’envergure pour le transport d’une vapeur de qualité inférieure de la centrale électrique vers les habitations et les sites industriels. Cependant, bien que ce dispositif ait présenté un rendement plus élevé que les systèmes uniquement électriques, la distribution réelle de l’énergie n’était souvent pas efficace et ne donnait guère la possibilité de contrôler individuellement l’énergie fournie.

17. Des initiatives ont été lancées pour mettre en place divers systèmes de production combinée de chaleur et d’électricité à partir du gaz, généralement au moyen de moteurs à piston alternatif alimentés au gaz, souvent du gaz naturel, du gaz de pétrole liquéfié ou du biogaz. Dans ces systèmes de production combinée de chaleur et d’électricité, le moteur entraîne un alternateur qui produit de l’électricité tandis que la chaleur du moteur est récupérée et mise à disposition sous forme d’eau chaude ou de vapeur. Cette méthode donne un rendement très élevé. Toutefois, à une époque où les émissions de carbone sont limitées, l’utilisation de tous les combustibles fossiles suscite des inquiétudes et il est donc demandé

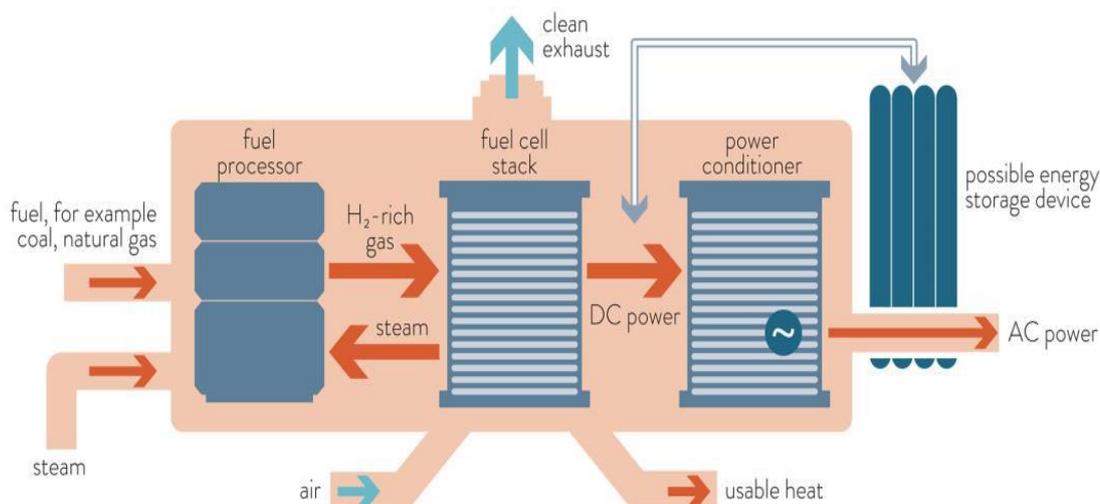
de limiter l'utilisation du charbon et du gaz pour d'autres applications énergétiques. Il s'agit d'une vision trop simpliste, car il existe des moyens d'utiliser à la fois le charbon et le gaz avec des émissions de carbone proches de zéro, tout en obtenant des rendements élevés.

IV. Rôle potentiel des piles à combustible en cours de mise au point

18. Une méthode en cours d'élaboration est celle des piles à combustible fonctionnant à l'hydrogène qui convertissent, de manière électrochimique, l'énergie chimique des combustibles en énergie électrique (et en chaleur) et peuvent produire de l'énergie de manière efficace avec un faible impact sur l'environnement. Les applications des piles à combustible comprennent la production d'énergie stationnaire à grande échelle, la production combinée de chaleur et d'électricité distribuée et la production d'énergie portable. Elles sont fondées sur diverses options en matière de piles à combustible (Zhang, 2019).

Figure VI

Schéma d'un système de production d'électricité à piles à combustible (Nehir et Wang, 2016)



19. Les piles à combustible sont des dispositifs électrochimiques qui convertissent directement l'énergie chimique des réactants en électricité et en chaleur avec un rendement élevé. Elles produisent de l'électricité en continu, à condition qu'il y ait une source de combustible. La nature de ce processus, qui ne comporte qu'une seule étape puisque l'on passe de l'énergie chimique à l'énergie électrique, présente plusieurs avantages par rapport aux méthodes conventionnelles de production d'électricité, qui comportent plusieurs étapes, à savoir que l'on passe de l'énergie chimique à l'énergie thermique puis à l'énergie mécanique et enfin à l'énergie électrique. Parmi les avantages potentiels, citons le haut rendement de la production combinée de chaleur, de froid et d'électricité (rendement électrique allant jusqu'à 60 % et rendement combiné de plus de 90 % en mode cogénération), la densité de puissance élevée, l'empreinte carbone négligeable, les faibles émissions, le niveau sonore peu élevé et la haute qualité de l'électricité. Les piles à combustible intégrées à une centrale électrique alimentée au charbon pourraient produire du CO₂ concentré prêt à être capté. Elles sont de nature modulaire et ne subissent pas de « pénalités énergétiques » importantes lorsqu'elles sont réduites à une petite taille.

20. Pour la production d'électricité stationnaire à grande échelle, l'intégration d'un procédé de gazéification du charbon à des piles à combustible à haute température (IGFC) offre la possibilité de créer des systèmes de production d'électricité à très haut rendement et à faibles émissions. Le Ministère américain de l'énergie (DOE) encourage la recherche-développement concernant les technologies des piles à combustible dans le cadre de programmes de recherche tels que la « Solid State Energy Conversion Alliance (SECA) ». Son but est de faire la démonstration d'un système IGFC de 10 MW et d'un autre de 50 MW d'ici à 2025. Dans l'ensemble, les défis à relever pour les piles à combustible stationnaires

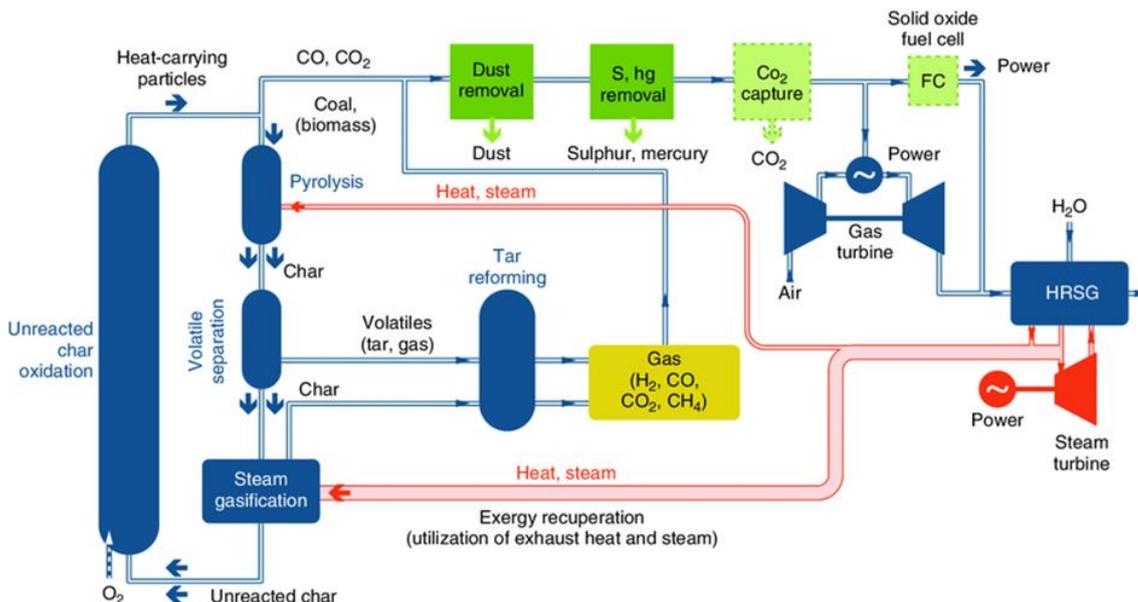
sont leur coût et leur durabilité. L'usine de démonstration du système IGFC devrait permettre de poursuivre le développement de ces technologies à des coûts réduits, ce qui en ferait une option prometteuse pour la production d'électricité.

21. La première usine de démonstration du système IGFC bénéficiant du soutien d'une agence gouvernementale est celle qui relève du projet Coolgen, en cours au Japon. Comme l'indique la figure VII, il s'agit d'un cycle combiné à gazéification intégrée (CCGI) à flux entraîné et à injection d'oxygène de 166 MW, présentant la possibilité de produire de l'hydrogène en faisant passer une partie du gaz de synthèse dans un réacteur catalytique, le sous-produit CO_2 étant retiré pour être utilisé ou stocké. Cela permet au système CCGI d'être alimenté uniquement par de l'hydrogène et il est possible de prélever un flux secondaire de gaz pour alimenter une pile à combustible. Dans un premier temps, l'usine sera alimentée par un mélange de gaz de synthèse et d'hydrogène, les performances étant améliorées en intégrant la production provenant de la pile à combustible.

22. À ce jour, l'exploitabilité du système CCGI a été prouvée et l'intention est maintenant de prouver qu'au moins 90 % du flux gazeux de CO_2 provenant du réacteur de conversion peut être capté et transporté hors de l'usine. Il s'agira ensuite de prouver que la pile à combustible pourra produire de l'énergie à partir de l'hydrogène créé dans le réacteur de conversion. L'objectif global est de démontrer d'ici à 2025 que l'intégration d'un procédé de gazéification du charbon à des piles à combustible à haute température (IGFC) peut atteindre une efficacité thermique nette de 55 %.

Figure VII

Schéma simplifié des flux de processus pour le projet Coolgen d'Osaki [Zhang X (2018)]



23. À ce jour, les performances de base du cycle combiné à gazéification intégrée (CCGI) à injection d'oxygène, qui est une technologie de base de l'intégration de la gazéification du charbon à des piles à combustible (IGFC), ont été prouvées. Dans ce cadre, les caractéristiques de fonctionnement et les aspects économiques du système ont également été évalués. On s'emploie désormais à démontrer les qualités du système CCGI à injection d'oxygène avec captage de CO_2 . La troisième étape consistera à étudier s'il est possible d'améliorer le rendement en combinant des piles à combustible avec le système CCGI à injection d'oxygène, le projet devant s'achever d'ici à 2025 (Osaki Coolgen Corporation, 2021).

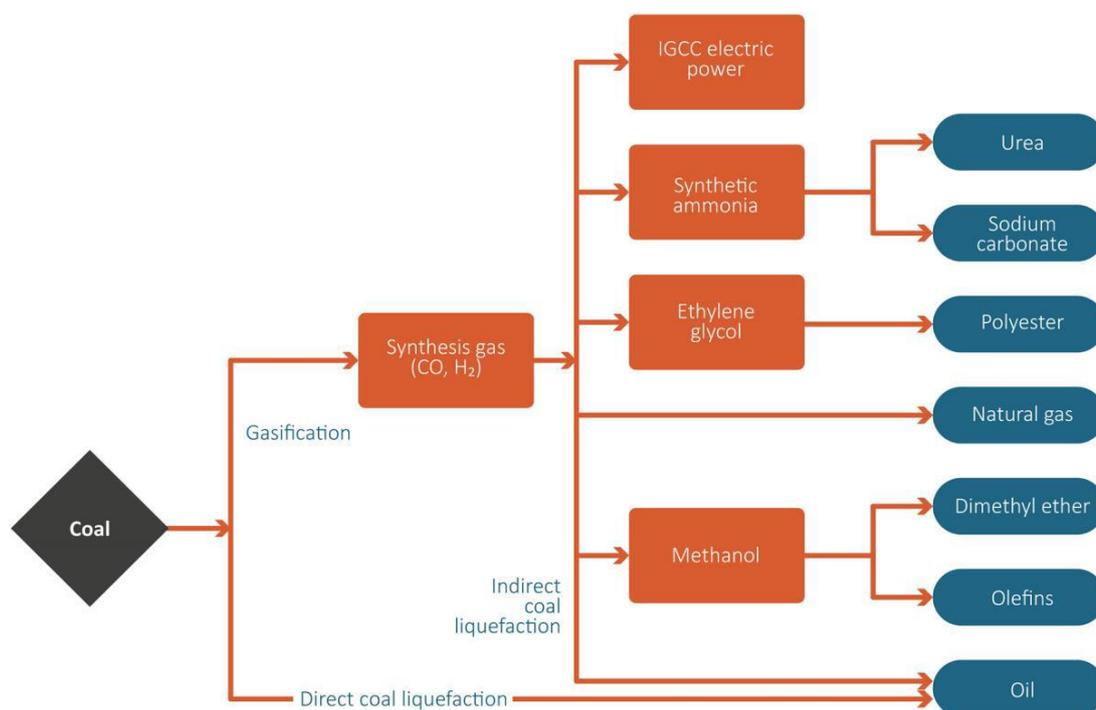
V. Utilisation de la gazéification du charbon pour produire des produits chimiques et les combustibles du futur

A. Introduction

24. La gazéification du charbon visant à produire un gaz de synthèse ($\text{CO} + \text{H}_2$) est un procédé qui non seulement peut fournir de l'hydrogène, mais peut aussi, grâce à un traitement ultérieur, permettre de convertir ces produits primaires en produits de plus grande valeur et plus faciles à utiliser, notamment une large panoplie de produits chimiques, ainsi que de combustibles du futur tels que le méthanol, l'éther diméthyle, le gaz naturel synthétique et les carburants liquides destinés au transport (fig. VIII).

Figure VIII

Schéma démontrant la flexibilité du produit final issu du procédé de gazéification (Seeking Alpha, 2012)



25. En principe, cette technologie peut répondre à un besoin stratégique important, notamment dans divers pays en développement et en voie d'industrialisation où le charbon est la principale source de combustible alors que la disponibilité du pétrole et du gaz peut être limitée. Elle offre les moyens de résoudre de manière équilibrée le trilemme que constituent en matière d'énergie la sécurité, l'intérêt économique et, avec les systèmes de contrôle appropriés, un impact environnemental acceptable.

26. Il existe plusieurs conditions préalables à la mise en place de cette technologie (Minchener, 2019), parmi lesquelles la nécessité de :

- Disposer d'abondantes réserves de charbon gazéifiable à faible coût, généralement sous forme d'actifs bloqués en raison de leur qualité médiocre ou de leur emplacement ;
- Disposer d'un gouvernement d'accueil ayant la capacité et la volonté de fournir un soutien pour les dépenses d'investissements très élevées requises ;
- Être en mesure de couvrir les coûts des infrastructures nécessaires, tant pour l'approvisionnement en matières premières que pour le transport des produits finis ;
- Avoir les moyens de garantir le respect des prescriptions adéquates en matière de capacité institutionnelle.

B. Déploiement des technologies

27. Le premier déploiement commercial à grande échelle a eu lieu en Afrique du Sud, à l'époque où les importations de pétrole y étaient complexes pour des raisons politiques. Depuis lors, la production de combustibles de synthèse grâce à la liquéfaction du charbon a été maintenue, tandis que la forte production de produits chimiques à partir de charbon a été convertie pour utiliser, comme matière première, le gaz naturel au lieu du charbon (Sasol, 2010).

28. Une démonstration à grande échelle de la production de gaz naturel synthétique à partir de charbon (CTSNG) a ensuite été effectuée aux États-Unis, mais n'a pas été poursuivie en raison de l'existence d'autres sources de gaz moins coûteuses (netl, 2020).

29. La Chine est désormais le leader technologique pour avoir établi et soutenu financièrement à l'échelle commerciale un important secteur de conversion du charbon de qualité médiocre. Elle offre un modèle de déploiement à grande échelle de la transformation du charbon en produits chimiques et en combustibles gazeux et liquides, à tous les stades du cycle de développement industriel. Le secteur chimique chinois a eu besoin de 250 Mt de charbon en 2019, et ce chiffre augmentera considérablement lorsque de nouvelles capacités de production seront opérationnelles (Reid, 2021). Des investissements massifs se poursuivent avec l'implantation de 150 nouvelles installations entre 2018 et 2020, et de 220 autres usines qui devraient être achevées d'ici à 2023.

30. Dans le sous-secteur des combustibles synthétiques, les principales options sont les combustibles liquides à base de charbon et le gaz naturel synthétique à base de charbon. Ces projets à grande échelle représentent des dépenses d'investissement initiales considérables qui couvrent les installations de conversion du charbon elles-mêmes et les besoins en infrastructures connexes. Le coût de production du charbon peut être raisonnablement bien estimé et il est en général relativement stable. En revanche, les coûts du pétrole et du gaz, à partir desquels les produits finis peuvent également être fabriqués, ont toujours été plus instables. Par conséquent, la rentabilité globale est très difficile à estimer pour la durée de vie nominale de cinquante ans du procédé, étant donné qu'il y aura des moments où les produits finals à base de pétrole et de gaz seront plus compétitifs que ceux qui sont fondés sur le charbon (Minchener, 2019).

31. Tant à l'intérieur qu'à l'extérieur de la Chine, des inquiétudes subsistent quant aux coûts d'approvisionnement élevés et à l'incertitude des cours à terme du pétrole et du gaz. Par exemple, le grave effondrement des cours internationaux du pétrole en 2014, qui sont passés de plus de 100 dollars É.-U. à seulement 30 dollars É.-U. le baril, a eu un impact notable sur le programme sectoriel global de conversion du charbon en Chine. Le seuil de rentabilité auquel ces futurs procédés seront financièrement intéressants sera celui où les cours internationaux du pétrole brut seront supérieurs à 60 dollars É.-U. le baril, bien qu'il existe divers seuils de rentabilité selon le procédé, le coût du charbon et la situation locale.

32. Le programme de transformation du charbon en produits chimiques est piloté par le Gouvernement chinois par le truchement de la Commission nationale du développement et de la réforme, qui formule les politiques de développement économique et social, maintient l'équilibre du développement économique et dirige la restructuration du système économique (Woodall B, 2014). Dans le cadre de ses plans visant à limiter une éventuelle vulnérabilité future à l'égard des importations de certains produits à moindre coût, la Commission a centralisé l'approbation des nouveaux projets de conversion du charbon. Tout en introduisant diverses contraintes relatives à l'utilisation de l'eau, à l'efficacité énergétique et à la protection de l'environnement, elle a également imposé aux promoteurs de projets l'obligation de montrer qu'ils sont en mesure de résoudre ultérieurement le problème de l'intensité des émissions de CO₂.

33. Dans ce secteur, on estime que la transformation du charbon en méthanol, en éther diméthylé et en hydrogène représente des technologies matures. L'hydrogène issu du charbon offre une option compétitive en tant que combustible et matière première dépourvus de carbone destinés aux processus manufacturiers et industriels tels que la production de ciment et la fabrication d'acier, le transport, la production de matières premières industrielles, le chauffage et l'électricité des bâtiments, ainsi que la production d'énergie.

34. Après avoir connu des difficultés considérables, les procédés de transformation du charbon en combustibles liquides fonctionnent désormais de manière satisfaisante, et des prototypes d'usines commerciales de plus grande envergure sont en cours d'implantation (transformant, par exemple, 2 millions de tonnes par an de charbon en combustibles liquides dans la province de Ningxia). Par contre, pour la conversion du charbon en gaz naturel synthétique, en raison notamment du type de gazéificateur choisi pour les premières unités de démonstration, les performances opérationnelles ont posé problème car les normes environnementales requises ne sont pas toujours respectées. Conformément à la politique nationale, le Gouvernement a remanié son approche en mettant davantage l'accent sur les importations de gaz tout en resserrant le processus d'approbation des unités supplémentaires.

C. Situation au regard des procédés de production d'hydrogène à partir du charbon

35. L'hydrogène suscite un intérêt croissant en tant que solution de remplacement de différents combustibles fossiles en raison de sa teneur nulle en carbone. En 2018, la demande mondiale annuelle totale d'hydrogène était d'environ 115 Mt, cette quantité étant produite presque entièrement à partir de combustibles fossiles (charbon et gaz naturel) sur les lieux de consommation. Le charbon représente actuellement 27 % environ de l'énergie requise pour la production d'hydrogène et le gaz naturel plus de 70 % du reste (Kelsall, 2021). Selon les prévisions, la demande mondiale annuelle d'hydrogène pour 2050 devrait atteindre quelque 650 Mt, soit environ 14 % de la demande énergétique mondiale totale prévue (Kelsall, 2021).

36. L'hydrogène non polluant sera probablement adopté dans les applications où il constituera la seule option viable en matière de décarbonisation, ou lorsqu'il présentera un avantage avéré par rapport aux solutions concurrentes. Ces applications sont les suivantes : utilisation de matières premières dans l'industrie chimique et dans la production de fer et d'acier primaire, utilisation de carburants pour le transport maritime à longue distance et stockage dans les systèmes électriques « insulaires ». Parmi les autres applications pour lesquelles l'hydrogène pourrait devenir la solution privilégiée en matière de décarbonisation, citons l'utilisation de carburants dans l'aviation, l'utilisation de carburants pour le transport routier sur de longues distances, l'utilisation dans les bâtiments pour compléter l'électrification ainsi que le stockage/l'amortissement des fluctuations dans les systèmes électriques interconnectés. L'approche fondée sur le charbon peut produire un flux d'hydrogène d'une pureté d'environ 99,8 %. Si le premier producteur mondial est la Chine, d'autres pays vont également de l'avant. Le Japon a élaboré un plan stratégique en 2017 et figure parmi les premiers à reconnaître la nécessité d'établir l'hydrogène comme un carburant clef pour plusieurs applications. La Corée du Sud a suivi de près cette approche en établissant sa propre feuille de route visant à développer une société de l'hydrogène et en mettant l'accent sur le secteur des transports.

37. Pour faire progresser le déploiement de l'hydrogène, les pouvoirs publics devront prendre des mesures favorisant l'envoi de signaux positifs à long terme aux investisseurs potentiels et visant à stimuler la demande d'hydrogène non polluante sur les marchés, existants et nouveaux, à réduire le risque pour les investisseurs et à développer des modèles économiques, à fixer un programme de recherche-développement technologique et à soutenir l'établissement d'un cadre réglementaire (Kelsall, 2021).

D. Défis environnementaux

38. Du point de vue de l'environnement, un sujet de préoccupation est la disponibilité de l'eau dans les régions plus arides du nord de la Chine, où se trouve la majeure partie du charbon de qualité adéquate. Pour tous les processus de conversion, il faut bien veiller à limiter l'utilisation de l'eau en optimisant le procédé et à recycler l'eau chaque fois que c'est possible. Là encore, le Gouvernement a fixé des normes strictes pour garantir un recyclage maximal de l'eau, et ces besoins doivent être pris en compte dans la conception du procédé et du plan opérationnel, qui représente une partie essentielle de la procédure d'approbation. Une série de techniques innovantes a par conséquent été mise en place. Cela étant, cette question pourrait à terme limiter l'ampleur du secteur de la conversion du charbon.

39. L'autre problème est la libération de CO₂ dans l'atmosphère. Certes, les produits finis présentent des attraits de poids et sont propres par rapport au charbon de qualité inférieure, mais leur production n'entraîne des rejets de CO₂ plus élevés que si le charbon utilisé a été brûlé. Si la croissance du secteur se poursuit, ce niveau d'émission de gaz à effet de serre pourrait avoir un impact négatif sur l'intention déclarée de la Chine de plafonner ses émissions de CO₂ d'ici à 2030. Cependant, ainsi qu'il a été décrit précédemment, le processus de conversion du charbon permet de concentrer le CO₂ avant qu'il ne soit libéré, ce qui offre alors, à un coût marginal potentiellement faible, un moyen de le capter et de l'utiliser pour améliorer l'extraction du pétrole. En Chine, de nombreux sites de gazéification du charbon sont de gros émetteurs à grande échelle de flux concentrés de CO₂, mais, ce qui est tout aussi important, il existe des concentrations d'unités de ce type sur divers sites industriels relativement proches des puits de pétrole. Cette approche présente un coût marginal faible par rapport à la mise en place du captage du CO₂ dans une centrale électrique alimentée au charbon. La production d'hydrogène par une gazéification du charbon entraînant une élimination du carbone est moins coûteuse que la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau (d'un facteur de trois environ), le coût étant de quelque 1,9-2,4 dollars É.-U. par kg de H₂, alors qu'il tombe à un niveau aussi bas que 1,6 dollar É.-U. par kg de H₂ en Chine. L'apprentissage par la pratique grâce à un déploiement commercial à grande échelle ainsi que les économies réalisées grâce aux innovations technologiques devraient permettre de réduire encore les coûts d'ici à 2050. En termes d'émissions, l'intensité en carbone de ce procédé est inférieure à 3 kg de CO₂ par kg de H₂. On pourrait augmenter ce taux en recourant au cotraitement d'une partie de la biomasse ou des déchets organiques avec la matière première qu'est le charbon, ce qui pourrait conduire à un taux net de CO₂ par kg de H₂ nul ou même négatif.

40. Il est très significatif que le groupe Sinopec, qui comprend la China Petroleum and Chemical Corp et qui est le plus grand raffineur du monde en volume, ait commencé des travaux de construction dans le cadre du premier projet national de captage, d'utilisation et de stockage du dioxyde de carbone (CUSC) d'une valeur s'élevant à des millions de tonnes dans la province de Shandong, située dans l'est de la Chine (China Daily, juillet 2021). Le début des opérations est prévu pour la fin de 2021. Le projet CUSC permettra de capter 10,68 millions de tonnes de CO₂ provenant de la raffinerie Qilu de Sinopec et, au cours des quinze prochaines années, de les injecter dans le champ pétrolifère de Shengli afin d'accroître la récupération du pétrole de quelque 2,97 millions de tonnes. Il s'agit du premier projet de démonstration d'un prototype commercial de CUSC en Chine. Une fois que l'efficacité de cette approche aura été démontrée, d'autres projets de ce type suivront, diverses options étant notamment possibles concernant des sites de transformation du charbon en produits chimiques et en combustibles du futur.

41. Le projet fournira également une assise solide à Sinopec pour la mise en œuvre de ses projets CUSC à plus grande échelle, aidant ainsi la Chine à honorer sa promesse de plafonner les émissions de carbone d'ici à 2030 et d'atteindre la neutralité carbone d'ici à 2060.

42. Récemment, d'autres pays ont déclaré leur intention d'investir dans la gazéification du charbon pour la production de carburants et d'engrais. Il s'agit notamment de l'Indonésie et de l'Inde, ainsi que du Pakistan et de divers pays africains qui agissent dans le cadre de l'initiative « Une Ceinture et une Route » (Reid I, 2021).

VI. Autres options en matière de transformation du charbon en produits

43. Si la gazéification constitue un moyen efficace de convertir le charbon en produits chimiques et en combustibles de qualité élevée, il existe d'autres approches permettant de produire un nombre croissant de produits non énergétiques qui présentent d'importants attraits et qui concurrencent également les dérivés du pétrole et du gaz (Reid I, 2018). Les résultats comprennent le brai, des éléments essentiels, le charbon actif, la fibre de carbone dérivée du brai, les matériaux pour électrodes et les nanomatériaux, malgré la persistance de défis commerciaux et environnementaux. Néanmoins, la possibilité d'utiliser le charbon comme matière première pour fabriquer ces produits a multiplié la création d'installations de fabrication à des fins commerciales dans le monde entier (Reid, 2021).

44. Les options les plus prometteuses sont énumérées ci-dessous :

a) La fibre de carbone à base de brai est dérivée du goudron de houille, qui est un sous-produit de la cokéfaction à haute température du charbon destiné à la fabrication du coke métallurgique. C'est le moyen peu coûteux le plus prometteur pour le déploiement de la fibre dans les transports et la construction. La fibre de carbone a largement remplacé les métaux dans la fabrication des fuselages des avions en raison du rapport coût-avantages (renforcement de la résistance/réduction du poids). Une utilisation dans les voitures électriques est également possible car le poids des batteries est actuellement un handicap, et il est nécessaire de trouver un moyen de contrebalancer ce problème en réduisant le poids du véhicule. De plus, la fibre de carbone offre des avantages supplémentaires, notamment une inertie chimique et une conductivité thermique qui peuvent prolonger la durée de vie des batteries. Il peut également y avoir des possibilités d'utilisation dans le secteur de la construction, les produits en fibre de carbone pouvant être adaptés aux matériaux d'isolation légers ou à des composants structurels (Reid, 2021) ;

b) Le graphène est une nouvelle forme plane de carbone aux propriétés particulières. Il peut être utilisé dans des capteurs, des produits médicaux, des composites, des batteries, des revêtements, des produits électroniques, des textiles et des applications automobiles (Graphene-Info, 2019). Les moyens de fabrication sont encore en cours de développement, avec quatre options porteuses de promesses, dont des techniques chimiques et des techniques de sels fondus, ainsi qu'une méthode de chauffage instantané par effet Joule qui pourrait être la méthode la plus facile à adapter afin de produire du graphène pour des produits de base ;

c) En agriculture, qu'il soit partiellement oxydé ou à l'état brut, le lignite peut être utilisé comme engrais à base d'humate pour contrer la détérioration des sols ;

d) L'autre option clef est l'extraction des minéraux du charbon car ils offrent une autre ressource en vue de l'extraction de terres rares qui sont essentielles pour les communications modernes, l'aérospatiale, les industries de transport électrique et diverses technologies relatives aux énergies renouvelables variables. Il est stratégiquement indispensable de sécuriser l'approvisionnement en terres rares. Cela peut être réalisé à partir du traitement des déchets de charbon, les essais initiaux devant dépasser les niveaux de pureté des terres rares visées, tandis que des mesures comme le tri aux rayons X visent à réduire l'impact de la concentration plus faible de terres rares dans le charbon par rapport aux minerais de terres rares. De nouvelles techniques offrent des moyens non chimiques de passer du charbon aux terres rares ainsi que la possibilité de réduire la gestion des déchets. Les procédures de restauration des mines désaffectées offrent un potentiel d'extraction de terres rares.

VII. La voie à suivre : les points essentiels à retenir

A. Gazéification du charbon pour les applications de production d'électricité et de production combinée de chaleur et d'électricité

45. La gazéification permet de remplacer des méthodes plus éprouvées de conversion de matières premières comme le charbon, la biomasse et certains flux de déchets en électricité et d'autres produits utiles. L'avantage de la gazéification dans le secteur de l'électricité est le fait qu'elle offre un moyen potentiellement moins coûteux d'éliminer le CO₂ tout en atteignant des rendements de cycle plus élevés par rapport aux systèmes de combustion du charbon. De nouvelles avancées technologiques en matière d'intégration, de conception des turbines et de processus d'appui permettront au cycle combiné à gazéification intégrée (CCGI) d'atteindre des rendements encore plus élevés. Pour autant, il s'agit d'un système plus complexe dont les coûts d'investissement sont plus élevés et, à ce jour, peu d'unités ont été déployées à l'échelle commerciale. Le Japon s'emploie à faire avancer les technologies dans ce domaine, mais il reste à voir si cette approche sera maintenue, étant donné le récent changement de politique opéré par ce pays à la réunion du G7 en 2021. Cela dit, la production

d'hydrogène à partir de la gazéification du charbon avec le captage, l'utilisation et le stockage du dioxyde de carbone pour la production d'électricité à taux de carbone quasi nul est une option prometteuse.

46. En fin de compte, la question de savoir si la gazéification aux fins de la production d'électricité et de la production combinée de chaleur et d'électricité concrétisera tout son potentiel commercial sera déterminée par les marchés de placement des technologies considérées, compte tenu de nombreux facteurs technico-économiques et politiques, notamment les coûts, la fiabilité, la disponibilité et la facilité d'entretien, les considérations environnementales, l'efficacité, la flexibilité des matières premières et des produits, l'infrastructure, la sécurité énergétique nationale, la perception du public et des gouvernements et surtout la politique.

B. Piles à combustible destinées à la production combinée de chaleur et d'électricité

47. Les systèmes de piles à combustible stationnaires peuvent faire partie de la solution visant à atteindre les objectifs environnementaux en matière d'émissions et à accroître l'efficacité de la production d'électricité. Les gros défis à relever sont le coût et la durabilité des piles. Ainsi, même si les piles à combustible à base d'hydrogène destinées à la production combinée de chaleur et d'électricité représentent une option intéressante, cela reste encore à prouver à l'échelle commerciale. Là encore, le Japon est un leader mondial disposant d'un programme stratégique, tandis que la Corée du Sud et les États-Unis entreprennent également des activités substantielles de recherche-développement.

48. Jusqu'à présent, les piles à combustible, assorties des technologies connexes, ont été construites à de très faibles volumes car la demande du marché était insuffisante pour permettre des investissements dans des activités de fabrication de pointe. La réduction du coût de fabrication peut être bénéfique pour tous les aspects des systèmes de piles à combustible, y compris les systèmes de production et de stockage de l'hydrogène et l'infrastructure nécessaire à ce produit. Le soutien des gouvernements à court terme est essentiel pour faire progresser les applications de piles à combustible stationnaires jusqu'à ce qu'elles soient prêtes à entrer sur le marché.

C. Utilisation de la gazéification du charbon pour produire des produits chimiques et les combustibles du futur

49. La gazéification visant à produire des combustibles gazeux et liquides peut répondre à un besoin stratégique important, notamment dans divers pays en développement et en voie d'industrialisation où le charbon est la principale source de combustibles alors que la sécurité de l'approvisionnement en pétrole et en gaz constitue un problème. Cependant, le déploiement commercial de ces technologies dans ces pays peut être complexe pour diverses raisons techniques et économiques. La Chine poursuit ses avancées technologiques et a mis en place un secteur industriel à l'échelle commerciale axé sur la conversion de charbon de qualité peu élevée et de faible valeur en produits chimiques de grande valeur, y compris les combustibles liquides et gazeux du futur. Il offre un modèle pour toutes les étapes de ce cycle de développement industriel, y compris les moyens de soutenir financièrement ces projets de conversion du charbon, et les infrastructures connexes requises.

50. Le rejet de CO₂ par les différents procédés de production de produits chimiques suscite toujours des inquiétudes, mais celles-ci peuvent être surmontées par l'intégration d'un réacteur de conversion qui fournit un flux concentré d'hydrogène et un flux résiduel de CO₂, ce dernier pouvant être stocké ou utilisé, ce qui permet d'obtenir un rejet quasi nul de carbone.

51. Dans le même temps, il est primordial d'accélérer la production et des mesures doivent être prises à court terme pour surmonter les obstacles et réduire les coûts afin de renforcer l'adoption de l'hydrogène. Les pouvoirs publics devront prendre des mesures pour envoyer des signaux positifs à long terme aux investisseurs potentiels, stimuler la demande d'hydrogène non polluante sur les marchés, existants et nouveaux, réduire le risque pour les investisseurs et développer des modèles économiques, fixer un programme de

recherche-développement technologique et enfin appuyer l'établissement d'un cadre réglementaire.

D. Du charbon aux minéraux essentiels, aux terres rares et aux produits non énergétiques

52. Cette approche technologique complète les options de gazéification du charbon dans la mesure où elle cherche à utiliser le charbon comme une ressource pour fabriquer des produits de grande valeur. En ce qui concerne les minéraux essentiels et les terres rares, il existe un besoin stratégique car les sources traditionnelles de ces matériaux sont très limitées et ces derniers servent à produire des composants qui sont essentiels pour la plupart des appareils de communication modernes, par exemple. Chose tout aussi importante, l'utilisation du charbon comme source de matériaux de transformation riches en carbone est un moyen révolutionnaire de revaloriser l'utilisation du charbon. Les possibilités d'exploitation commerciale sont considérables et, en outre, dans des secteurs du marché qui n'avaient auparavant que peu de liens avec le charbon. C'est pourquoi des programmes de recherche-développement de grande envergure sont en cours, leur objet étant d'établir des techniques de traitement efficaces afin de fournir la gamme de produits susmentionnés aux nouveaux secteurs du marché en question.

VIII. Bibliographie

- China Daily (2021) Sinopec's carbon capture project on. Disponible à l'adresse <http://global.chinadaily.com.cn/a/202107/06/WS60e3ab29a310efa1bd65fe3e.html> (juillet 2021)
- Collot A-G (2002) Matching gasifiers to coals, IEACCC Report CCC/65 (octobre 2002)
- Fernando R (2008) Coal gasification, IEACCC report CCC/140 (octobre 2018)
- Graphene-Info (2019) Graphene-Info's top 10 graphene applications of 2019. Disponible à l'adresse www.graphene-info.com/graphene-infos-top-10-graphene-applications-2019 (2019)
- Henderson C (2008) Future developments in IGCC, IEACCC report CCC/143 (décembre 2008)
- Kelsall G (2021) Coal to hydrogen IEACCC Report (juillet 2021, sous presse)
- Minchener A (2019) Development and deployment of future fuels from coal IEACCC report for the IEA Working party on Fossil Energy (juin 2019)
- Mitsubishi Power (2021) Nakoso IGCC Power plant completed. Disponible à l'adresse <https://power.mhi.com/news/20210419.html> (site consulté en juillet 2021)
- Nehrir M and Wang C (2016) Chapter 6 Fuel cells. In Electric Renewable Energy Systems, Rashid M H ed., ISBN: 978-0-12-804448-3, Elsevier, 92-113 (2016)
- netl (2013a) Gasifipedia: gasification in detail, fixed (moving) bed gasifiers. Disponible à l'adresse http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/gasification/gasifipedia/4-gasifiers/4-1-1_fmb.html (2013)
- netl (2013b) Gasifipedia: gasification in detail, entrained flow gasifiers. Disponible à l'adresse http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/gasification/gasifipedia/4-gasifiers/4-1-2_entrainedflow.html (2013)
- netl (2013c) Gasifipedia: gasification in detail, fluidized bed gasifiers. Disponible à l'adresse http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/gasification/gasifipedia/4-gasifiers/4-1-3_fluidizedbed.html (2013)
- netl (2020) Technology for SNG production. Disponible à l'adresse <https://www.netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/coal-to-sng> (site consulté en décembre 2020)

-
- netl doe (2021) Gasification introduction. Disponible à l'adresse <https://netl.doe.gov/research/Coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/intro-to-gasification> (site consulté en juin 2021)
- Osaki Coolgen Corporation (2021) Overview of the Osaki CoolGen Project. Disponible à l'adresse <https://www.osaki-coolgen.jp/en/project/overview.html> (site consulté en juillet 2021)
- Reid I (2018) Non-energy uses of coal, IEACCC Report CCC/291 (novembre 2018)
- Reid I (2021) Advances in non-energy products from coal IEACCC Report CCC/311 (juin 2021)
- Sasol (2010) Unlocking the potential wealth of coal. Disponible à l'adresse http://www.sasol.com/sasol_internet/downloads/CTL_Brochure_1125921891488.pdf Sasol, South Africa (2010)
- Seeking Alpha (2012) New vision: the potential for coal gasification and coal chemical industry development in Mongolia. Disponible à l'adresse <http://seekingalpha.com/article/850891-a-new-vision-the-potential-for-coal-gasification-and-coalchemical-industry-development-in-mongolia> (6 septembre 2012)
- Woodall B (2014) The Development of China's Developmental State: Environmental Challenges and Stages of Growth. China Research Center (document extrait en juin 2019)
- Zhang X (2018) Current status of stationary fuel cells for coal power generation. Disponible à l'adresse <https://www.researchgate.net/publication/326486840> (2018)
-