

ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE PROVENANT DES CHAÎNES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ ÉVALUER LA DIFFÉRENCE

JOSEPH V. SPADARO, LUCILLE LANGLOIS ET BRUCE HAMILTON

Au cours de la décennie écoulée, on s'est de plus en plus interrogé, dans le monde, sur l'impact qu'ont les activités humaines sur le système climatique mondial du fait des émissions de gaz à effet de serre. À ce jour, les discussions ont essentiellement porté sur les rejets – d'origine humaine – de dioxyde de carbone (CO₂), de méthane (CH₄), d'hémioxyde d'azote (N₂O) et de composés halogénés contenant du fluor, du chlore et du brome. Les concentrations atmosphériques de ces gaz ont considérablement augmenté depuis la période préindustrielle, faisant plus que doubler, en fait, dans le cas du méthane.

Afin de stabiliser les concentrations atmosphériques à un niveau qui réduirait le risque de changement climatique mondial important, plus de 130 pays ont ratifié, lors du Sommet de la Terre organisé en 1992 au Brésil, la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Suite à cette première mesure, il a été organisé à Kyoto, en décembre 1997, la 3^{ème} réunion de la Conférence des parties, où les décideurs ont fixé, pays par pays, des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Actuellement, les pays industrialisés – ou pays de l'Annexe I – sont responsables d'une grande partie des rejets de gaz à effet de serre dans le monde. Près des deux tiers des émissions de gaz à effet de serre peuvent être imputés à des activités associées à la production d'électricité et au secteur des transports. Le respect

du Protocole de Kyoto par les pays de l'Annexe I exigera par conséquent une solide volonté de développer et d'exploiter des sources d'énergie émettant peu de carbone. L'amélioration des techniques de conversion du combustible en énergie jouera également un rôle important lorsque ces pays devront satisfaire la future demande d'énergie. Les pays en développement n'étant pas, quant à eux, liés par le Protocole de Kyoto et leur consommation d'énergie augmentant, le taux d'émission de gaz à effet de serre y croît très rapidement et leur part devrait dominer les rejets mondiaux à la fin du premier quart du XXI^e siècle.

Étant donné que la production d'électricité est l'une des principales sources d'émission de gaz à effet de serre (elle représente maintenant un tiers des émissions mondiales), l'AIEA a entrepris – dans le cadre de son Programme d'évaluation comparative des sources d'énergie – d'étudier les émissions de gaz à effet de serre provenant de toutes les activités (chaînes) de production d'électricité utilisant des combustibles fossiles, l'énergie nucléaire et des énergies renouvelables. L'AIEA a donc organisé, d'octobre 1994 à juin 1998, six réunions de groupes consultatifs consacrées aux chaînes de combustible suivantes : lignite, charbon, pétrole, gaz, nucléaire, biomasse, hydroélectricité, et énergie éolienne et solaire. Ces réunions ont produit deux types de résultat. Premièrement, les participants ont mis au point,

pour l'ensemble de la chaîne énergétique liée à la production d'électricité, un ensemble cohérent de coefficients d'émission de gaz à effet de serre. Deuxièmement, ils ont mis en avant, s'agissant des combustibles et des technologies, des solutions qui pourraient être exploitées pour faciliter le respect des engagements contractés au titre de la Convention-cadre des Nations Unies. Le présent article énumère et commente les résultats et les principales conclusions de ces réunions.

COEFFICIENTS D'ÉMISSION DE GAZ À EFFET DE SERRE

Les coefficients d'émission de gaz à effet de serre ont été analysés pour différents types de combustible dans le cadre de divers études. Les résultats sont exprimés en grammes d'équivalent carbone (y compris le CO₂, le CH₄, le N₂O, etc.) par kilowatt/heure d'électricité (gCeq/kWh). Le graphique de la page 21 présente des données provenant de centrales électriques existantes (technologie des années 90) et des coefficients d'émission correspondant à des systèmes qui devraient être opérationnels à court ou moyen terme (technologies des années 2005-2020).

Les auteurs travaillent à la Section de la planification et des études économiques du Département de l'énergie nucléaire de l'AIEA. Les références complètes du présent article sont disponibles auprès de ces personnes.

GAZ À EFFET DE SERRE ET DÉVELOPPEMENT ÉNERGÉTIQUE

Une série de fiches publiées par le secrétariat de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques montrent comment les activités humaines produisent des gaz à effet de serre. Les principales réalités énoncées sont les suivantes :

- La plupart des activités humaines émettent des gaz à effet de serre, et nombre de ces activités sont désormais indispensables à l'économie mondiale.
- Le dioxyde de carbone découlant de l'utilisation de combustibles fossiles est la principale source de gaz à effet de serre provenant d'activités humaines. L'offre et la consommation de combustibles fossiles représentent en effet près des trois quarts des émissions de dioxyde de carbone provenant d'activités humaines.
- La plupart des émissions liées à la consommation d'énergie se produisent lors de la combustion de combustibles fossiles. Le pétrole, le gaz naturel et le charbon fournissent l'essentiel de l'énergie utilisée pour produire de l'électricité, chauffer les logements et faire fonctionner les automobiles et les usines. Si le combustible brûlait complètement, le seul sous-produit contenant du carbone serait le dioxyde de carbone. Mais la combustion, souvent incomplète, produit également du monoxyde de carbone et d'autres hydrocarbures. La combustion produit de l'hémioxyde d'azote et d'autres oxydes d'azote parce qu'elle combine l'azote présent dans le combustible ou dans l'air à l'oxygène présent dans l'air.
- L'extraction, le traitement, le transport et la distribution de combustibles fossiles entraînent également des émissions de gaz à effet de serre.

Pour de plus amples renseignements, consulter le dossier d'information de la Convention-cadre sur les changements climatiques à l'adresse Internet www.unfccc.de.

Les estimations reflètent les différences de méthode d'évaluation, de rendement de conversion, de méthode de préparation du combustible et de transport subséquent vers la centrale électrique, ainsi que des réalités locales tels que le panachage de combustibles jugé nécessaire pour répondre aux besoins en électricité liés à la construction des centrales et à la fabrication des équipements. Les taux futurs tiennent compte des améliorations apportées au processus de conversion du combustible en énergie, des réductions opérées pendant l'extraction et le transport du combustible, et de la réduction des émissions opérée pendant la construction des centrales et des équipements.

Pour ce qui est des combustibles fossiles, le taux d'émission total correspond à la somme des émissions de cheminées produites pendant la combustion et des rejets provenant des activités ou chaînes d'amont et d'aval. Généralement, les émissions de gaz à effet de serre

provenant de la construction et du déclassement de centrales et celles provenant des lignes électriques reliant la centrale au réseau sont négligeables. Par exemple, 1% seulement des émissions totales de gaz à effet de serre peuvent être attribuées à la construction et au déclassement de centrales.

S'agissant de l'hydroélectricité, de l'énergie solaire et de l'énergie éolienne, la taille et le type de la centrale sont, dans l'analyse, déterminants. Des considérations telles que l'implantation géographique et les règles locales de construction influencent fortement le taux d'émission. L'impact de ces facteurs sur le taux d'émission de gaz à effet de serre apparaît dans le graphique.

Les réunions de groupes consultatifs organisées par l'AIEA ont toutes montré que les technologies à base de combustibles fossiles ont des coefficients d'émission plus élevés, celui du gaz naturel atteignant près de la moitié de celui du charbon et du lignite, et environ deux tiers du coefficient estimatif

du fioul. L'énergie nucléaire et l'hydroélectricité, en revanche, ont des coefficients d'émission plus faibles, de 50 à 100 fois inférieurs à ceux du charbon (en fonction de la technologie). Les coefficients d'émission liés à l'énergie solaire se situent entre les deux et sont légèrement supérieurs à ceux liés au nucléaire.

MÉTHODE D'ANALYSE

Dans une analyse du cycle de vie, le but est de déterminer les contraintes environnementales liées à la création d'un produit en tenant compte, à chaque étape de la procédure, du débit massique et des flux énergétiques. Dans le cas de la production d'électricité, le produit final est 1 kWh d'énergie.

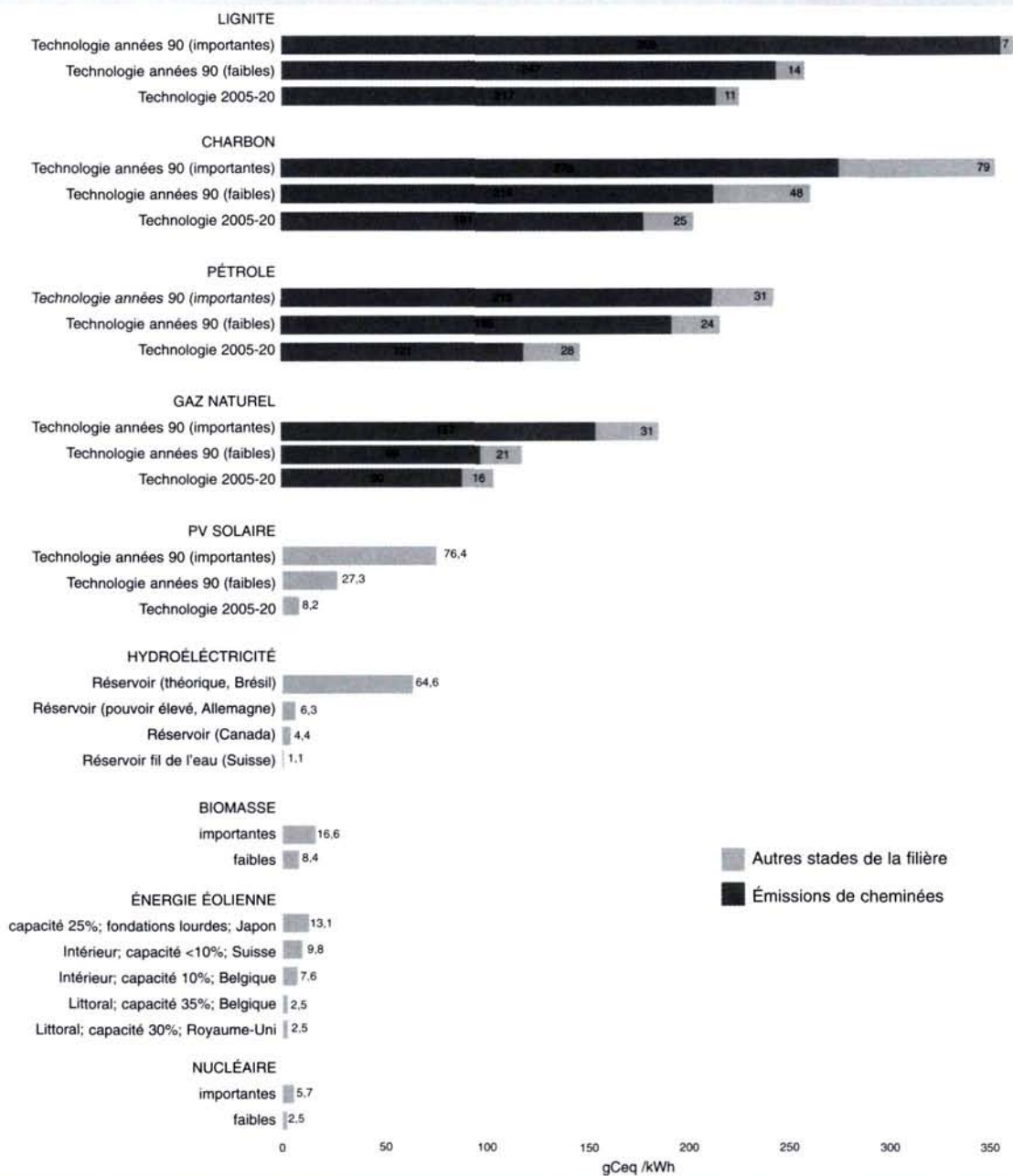
Parfois, une analyse du cycle de vie – ou analyse de filière – se complète d'une analyse intrants-extrants. Une telle analyse prend en compte les émissions indirectes imputables à différents secteurs économiques contribuant à la création du produit final, comme par exemple l'électricité utilisée dans la fabrication, la conception de machines et la main-d'œuvre.

Si l'on néglige ces intrants, on risque de sous-estimer les conséquences écologiques en réduisant artificiellement le champ de l'analyse. Par exemple, lorsque l'on compare les coefficients d'émission des combustibles fossiles en tenant compte des intrants et des extrants, on obtient un résultat supérieur de 30% à celui obtenu par l'analyse de filière. Dans le cas de l'énergie nucléaire, l'écart peut être encore plus prononcé, voire atteindre le double.

CHAMP D'ANALYSE

Lorsque l'on compare différents systèmes énergétiques, le choix du champ d'analyse revêt une grande importance. Par exemple, si l'on ignore, pour les cycles du combustible fossile, les activités d'amont et d'aval, on risque de sous-estimer de 5 à 25% le taux

ÉMISSIONS TOTALES DE GAZ À EFFET DE SERRE PROVENANT DES CHAÎNES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ



Source : AIEA

d'émission total de gaz à effet de serre. Pour l'énergie nucléaire et les énergies renouvelables, il ne se produit aucune émission de gaz à effet de serre au point de production, mais des rejets atmosphériques se produisent pendant l'extraction, la préparation et le transport du

combustible, la construction et le déclassement des centrales, la fabrication des équipements et la décomposition des matières organiques. Le niveau d'émission dépend fortement de la technologie utilisée et de l'implantation géographique de la centrale.

La façon la plus juste de comparer les contraintes climatiques et environnementales liées à différents combustibles et à différentes techniques de production d'électricité est peut-être d'effectuer un calcul portant sur la filière énergétique complète, en prenant en compte tous les

stades du cycle de vie. Au bout du compte, les moyens d'analyse et le sens commun dicteront le choix du champ d'analyse. Pour le moins, les intensités d'émission devront inclure la filière d'approvisionnement en combustible, le stade de production d'électricité et, pour le nucléaire et les énergies renouvelables, les émissions liées à la construction des centrales et à la fabrication des équipements. Une analyse plus poussée pourrait étendre son champ jusqu'au stade de la consommation finale d'énergie, c'est-à-dire jusqu'au niveau des appareils électriques.

S'agissant des techniques intermittentes telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire et, dans une moindre mesure, l'hydroélectricité, la question se pose de savoir si le système analysé devrait englober ou non les sources de rechange (secondaires). Le mieux est de calculer séparément les émissions pour les systèmes primaires et secondaires. Cette méthode présente trois avantages. Premièrement, on peut déterminer strictement les émissions liées au système primaire à partir de l'utilisation d'une technique donnée. Deuxièmement, on peut déterminer clairement l'influence du rendement ou de la disponibilité annuel(le) (heures de fonctionnement par an). Troisièmement, on peut comparer différentes solutions de rechange.

INDICE DE RÉCHAUFFEMENT

L'indice de réchauffement est la mesure dans laquelle un gaz présent dans l'atmosphère peut piéger la chaleur irradiée par la surface de la Terre par rapport à un gaz de référence, généralement le dioxyde de carbone. La durée de vie atmosphérique des gaz variant fortement, les résultats sont calculés sur différents intervalles de temps. Généralement, on

choisit un horizon temporel de 100 ans.

On trouvera ci-après les estimations les plus récentes des indices de réchauffement (horizon temporel : 100 ans). Ces valeurs ont été calculées par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat pour les gaz à effet de serre les plus fréquemment émis par les filières de production d'électricité :

- dioxyde de carbone (CO₂) = 1;
- méthane (CH₄) = 21;
- hémioxyde d'azote (N₂O) = 310;
- hexafluorure de soufre (SF₆) = 23900;
- tétrafluorométhane (CF₄) = 6500;
- hydrocarbures fluorés (HFC) : HFC-134a = 1300;
- chlorofluorocarbones (CFC) : CFC-114 = 9300;
- hydrochlorofluorocarbones (HCFC) : HCFC-22 = 1700.

RENDEMENT DE CONVERSION

Le rendement de conversion du combustible en électricité et le coefficient de charge d'une centrale influencent tous deux le taux d'émission de gaz à effet de serre lors de la combustion. Le coefficient d'émission de gaz à effet de serre diminue lorsque soit le rendement de conversion, soit le coefficient de charge augmente. Les émissions de CO₂ dépendent de la teneur en carbone du combustible et du rendement de conversion, les taux de N₂O dépendent essentiellement de considérations liées à la filière de production, tandis que les rejets de méthane dépendent principalement des méthodes d'approvisionnement en combustible fossile. Globalement, le taux d'émission est inversement proportionnel au rendement de conversion. À un rendement de conversion d'exactly 40%, une augmentation supplémentaire de 1% réduit le taux d'émission de gaz à effet de serre de 2,5%. À des rendements inférieurs, la

réduction du taux d'émission est plus prononcée, tandis qu'à des rendements supérieurs, c'est l'inverse qui se produit. Le rendement thermique diminue toujours avec le coefficient de charge, son évolution dépendant fortement de la technologie utilisée.

Les rendements de conversion typiques des systèmes d'exploitation actuels sont compris entre les valeurs suivantes : 27 à 40% pour les centrales fonctionnant au lignite, 30 à 45% pour le charbon, 34 à 43% pour le pétrole et 35 (en charge de pointe) à 55% pour le gaz naturel. Les centrales ayant des rendements inférieurs sont généralement celles implantées dans des pays en développement.

À moyen terme, le rendement de conversion des meilleures technologies disponibles devrait être de l'ordre de 50 à 55% pour le charbon et de 60 à 65% pour les centrales fonctionnant au gaz.

Dans le domaine du nucléaire et des énergies renouvelables, la réduction des émissions liée à l'amélioration des rendements de conversion aura un impact plus faible, car il n'y a pas d'émissions de cheminées; la plupart des rejets proviennent davantage de l'approvisionnement en combustible, de la construction des centrales et de la fabrication des équipements. En fait, les besoins en combustible et les émissions totales vont diminuer à mesure que de nouvelles technologies permettront d'améliorer les rendements.

FUTURS SYSTÈMES DE PRODUCTION

Des techniques nouvelles et plus rationnelles vont inévitablement supplanter les systèmes actuels, même si à court et moyen termes (10 à 20 prochaines années), on ne prévoit pas, dans les pays industrialisés, d'évolution radicale des techniques de production

FACTEURS INFLUANT SUR LES TAUX D'ÉMISSION

Le taux d'émission de gaz à effet de serre est influencé par plusieurs facteurs. Les paramètres dominants pour chaque type de combustible sont résumés ci-après.

Combustibles fossiles

- Caractéristiques du combustible (teneur en carbone, pouvoir calorifique, etc.);
- Type de mine et emplacement;
- Méthodes d'extraction du combustible (conditions de transport, rejets de méthane);
- Pertes de transport pour le gaz naturel;
- Rendement de conversion;
- Panachage de combustibles pour répondre aux besoins en électricité liés à l'approvisionnement et à la construction/au déclassement des centrales.

Hydroélectricité

- Type (fil de l'eau ou réservoir);
- Emplacement de la centrale (climat tropical/septentrional);
- Énergie consommée pour la construction du barrage;
- Émissions dues à la construction de la centrale (béton et acier), qui dominent pour les centrales au fil de l'eau et les réservoirs de type alpin (montagneux). Pour les grands réservoirs (généralement situés dans des régions septentrionales telles que le Canada et la Finlande) dont le rapport surface/volume est important et dans les régions tropicales humides (Brésil), le taux d'émission de gaz à effet de serre est influencé par la décomposition de la biomasse immergée et par l'oxydation des sédiments de surface (responsables d'importantes émissions de CH₄). Les émissions de CO₂ pour les réservoirs de type "septentrional" sont au moins dix fois supérieures aux taux de CH₄.

Biomasse

- Propriétés de la matière première (humidité et pouvoir calorifique);
 - Énergie consommée pour obtenir la matière première (culture, récolte et transport);
 - Technologie utilisée par la centrale.
- Le coefficient d'émission de dioxyde de carbone, pour la combustion de biomasse, est neutre, ce qui revient à dire que le carbone rejeté pendant la combustion de la biomasse équivaut à l'absorption biotique qui a lieu pendant la culture des plantes.

Énergie nucléaire (réacteur à eau ordinaire)

- Énergie consommée pour l'extraction, la conversion, l'enrichissement et la construction/le déclassement (plus équipements);
- Enrichissement du combustible par diffusion gazeuse, processus à forte intensité énergétique qui peut accroître, dans une certaine mesure, les rejets de gaz à effet de serre par rapport à un enrichissement par centrifugeuse;
- Émissions provenant de la phase d'enrichissement, fortement fonction du pays car dépendantes du panachage local de combustibles;
- Retraitement du combustible (oxyde d'uranium ou oxyde mixte), qui peut représenter 10 à 15% des émissions totales de gaz à effet de serre liées au nucléaire.

Énergie éolienne

- Énergie consommée pour fabriquer les pales et construire l'installation (tour et fondations);
- Parts des différentes sources d'électricité et règles de construction, fortement fonction du pays et du site (implantation intérieure ou côtière, par exemple);
- Rendement annuel ou coefficient d'utilisation (dépend du choix du site naturel), qui définit la fréquence d'exploitation (disponibilité) de l'installation. La vitesse moyenne du vent est le paramètre essentiel lorsqu'on évalue le degré d'intermittence de la production (une augmentation de 50% de la vitesse du vent double globalement le rendement annuel).

Photovoltaïque (PV) solaire

- Quantité et qualité du silicium utilisé pour la fabrication des cellules;
- Type de technologie (matériau amorphe ou cristallin);
- Type d'installation (toit ou façade);
- Panachage des combustibles pour répondre aux besoins en électricité;
- Rendement annuel et durée de vie présumée de l'installation, considérations importantes lors du calcul des émissions par kWh (cela vaut également pour l'énergie éolienne). Les énergies solaire et éolienne ont des coefficients d'émission relativement faibles par kWh, mais élevés par kWh en raison de coefficients d'utilisation plus faibles (technologies intermittentes).

d'électricité étant donné les sommes importantes déjà investies dans les technologies et l'infrastructure énergétiques. L'apparition de nouveaux systèmes énergétiques ne va pas autant de soi

dans les pays en développement, qui font face à de difficiles choix économiques, sociaux, politiques et environnementaux.

La volonté d'atténuer les conséquences de la pollution et

différents facteurs économiques et politiques inciteront à promouvoir et à utiliser des technologies améliorées et à développer l'utilisation de sources d'énergie renouvelables telles que la

biomasse, l'énergie éolienne et l'énergie solaire.

Pour les systèmes utilisant des combustibles fossiles, les changements les plus importants viendront des améliorations apportées au rendement de conversion des technologies existantes (cycles combinés, par exemple), de la réduction du taux de perte de méthane lors du transport du gaz naturel, de l'amélioration de la récupération assistée du méthane pendant l'extraction du combustible, de la maîtrise des propriétés chimiques des combustibles (par exemple en lavant le charbon pour améliorer son pouvoir calorifique), et de l'optimisation de l'implantation des centrales électriques pour réduire les émissions et les pertes dues au transport. En Europe, des experts ont estimé que les émissions provenant des futurs systèmes à combustibles fossiles pourraient être de 35 à 50% inférieures aux taux actuels.

Pour ce qui est de l'énergie nucléaire, les importants changements prendront la forme d'un enrichissement du combustible par centrifugeuse (ou laser) plutôt que par la méthode, à forte intensité énergétique, de la diffusion gazeuse; d'une amélioration du rendement de conversion; d'un développement du recours au retraitement du combustible; et des futurs progrès des techniques nucléaires de production d'électricité (*voir articles pages 43 et 51*).

L'amélioration de la technologie des turbines permettra de réduire les émissions provenant de l'hydroélectricité, tandis que sur les systèmes intermittents, la réduction des besoins en équipements et en composants et l'amélioration du rendement de conversion amélioreront les performances, ce qui permettra également de réduire les coûts et les émissions. L'implantation géographique des centrales

hydroélectriques ainsi que le type d'installation conserveront toute leur importance.

CONCLUSIONS

Les gaz à effet de serre peuvent influencer sur les changements climatiques mondiaux en interférant avec le processus naturel d'échange de chaleur qui se produit entre l'atmosphère terrestre et l'espace extra-atmosphérique. La réduction des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre est devenue une priorité internationale, comme en témoigne la signature du Protocole de Kyoto, qui réduirait les émissions provenant des pays industrialisés (Annexe I) d'environ 5% par rapport aux niveaux de 1990 pendant la période d'engagement (2008-2012).

Plusieurs solutions techniques pourraient être mises en œuvre pour atteindre les objectifs de réduction proposés. Pour ce qui est des émissions liées à la production d'électricité, le facteur le plus important à court terme est peut-être l'amélioration du rendement énergétique à tous les stades du cycle du combustible, y compris la préparation et le transport du combustible, et la conversion du combustible en électricité au niveau tant de la centrale que de l'utilisation finale (ce qui n'a pas été envisagé ici).

Les stratégies visant à réduire les rejets de méthane pendant l'extraction du combustible et le transport du gaz présentent un grand intérêt. Le passage à des combustibles émettant moins de produits carbonés ou à des combustibles à faible teneur en carbone tels que le gaz, le nucléaire et les énergies renouvelables contribuera de façon importante à réduire les émissions. Ces changements, techniquement réalisables en mettant à profit les connaissances et l'expérience actuelles, ne nécessitent qu'une adaptation

minimale du mode de vie des consommateurs et représentent un roulement raisonnable du capital (gaz et nucléaire pour la production de la charge de base et énergies renouvelables sur des marchés étroits ou en charge de pointe).

Le présent article a présenté les coefficients d'émission de gaz à effet de serre relatifs à différents combustibles en prenant en compte la filière énergétique complète, c'est-à-dire en tentant de quantifier les émissions provenant de tous les stades de la production d'électricité. Les techniques faisant appel à des combustibles fossiles présentent les coefficients d'émission les plus élevés, le charbon ayant un coefficient deux fois plus élevé que le gaz naturel.

Compte tenu des importantes différences qui existent sur le plan des techniques de conversion du combustible en électricité, on peut dire que les coefficients d'émissions de gaz à effet de serre peuvent être légèrement supérieurs à ceux des systèmes photovoltaïques solaires actuels et jusqu'à deux fois supérieurs à ceux du nucléaire et de l'hydro-électricité. Les estimations concernant l'énergie éolienne et les filières utilisant la biomasse se situent entre les valeurs du solaire et du nucléaire.

Il est une importante conclusion qu'on ne saurait trop souligner : aucune technologie utilisée pour la fourniture et la consommation d'énergie – qu'il s'agisse de production ou de transport d'électricité, etc. – n'émet aucun gaz à effet de serre. Les écarts de coefficient d'émission entre les différentes solutions peuvent, cependant, être considérables. Ce fait influera certainement sur la prise de décisions concernant le choix des centrales électriques qui formeront les futurs systèmes énergétiques nationaux. □