

COMPARAISON DES OPTIONS ENERGETIQUES LE PROJET INTERINSTITUTIONS DECADES

PAR HANS-HOLGER ROGNER ET ARSHAD KHAN

Assurer des services adéquats et abordables dans le secteur énergétique est un élément essentiel du développement durable. L'enjeu consiste à développer les services les mieux à même d'appuyer le développement et d'améliorer la qualité de la vie, surtout dans les pays en développement, tout en réduisant au minimum les impacts que les activités humaines ont sur la santé et sur l'environnement.

La nécessité de concevoir et d'appliquer des stratégies durables dans le secteur de l'électricité a été soulignée à maintes reprises dans les instances internationales, notamment au Colloque d'experts de haut niveau sur l'électricité et l'environnement (Helsinki, 1991), à la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement (CNUED, Rio de Janeiro, 1992), à la 16e Conférence du Conseil mondial de l'énergie (Tokyo, 1995) et, tout récemment, à la troisième Conférence des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, tenue en décembre 1997 à Kyoto (Japon).

Action 21, programme adopté par la CNUED, insiste sur le fait que les questions d'environnement et de développement doivent être prises en compte dans le processus de prise de décisions. Le deuxième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) souligne qu'il faudrait évaluer de façon approfondie les options permettant de réduire les risques d'un changement du climat de la planète et que des politiques adéquates doivent être mises en oeuvre pour

favoriser l'adoption des techniques de conversion d'énergie les moins préjudiciables à l'environnement.

A la Conférence de Kyoto, les Etats ont adopté un protocole à la Convention sur les changements climatiques dont l'objectif est de réduire l'ensemble des émissions d'un groupe de six gaz à effet de serre d'ici à 2008-2012. Ce protocole implique que, collectivement, les pays industrialisés devront réduire de 5,2 % leurs émissions de gaz à effet de serre.

Dans ce contexte général, l'AIEA et huit partenaires internationaux ont lancé, au début des années 90, un projet interinstitutions intitulé DECADES. (Voir l'encadré page 4.) Ce projet a pour but de développer les bases de données et les méthodes d'évaluation comparative des diverses sources d'énergie et technologies de conversion.

Le présent article fait le point des progrès accomplis à ce jour dans le contexte de ce projet, en donnant des exemples de certaines des applications de ses outils informatiques et d'études de cas comparatives menées par des Etats Membres de l'AIEA.

OUTILS INFORMATIQUES

Les bases de données et les logiciels créés dans le cadre du projet DECADES ont pu être exploités efficacement pour plusieurs études d'évaluation comparative.

Comparaison de centrales électriques. Les rendements nets de la production de plusieurs types de centrales électriques (classiques aussi bien qu'à l'étude) ont été comparés. (Voir le graphique page suivante.) On

pourra noter que, bien qu'il soit possible d'obtenir des améliorations sensibles du rendement à la production dans le cas des techniques classiques basées sur le gaz, les améliorations escomptées du rendement des autres techniques classiques s'avèrent n'être que marginales. Toutefois, les nouvelles technologies, basées sur des procédés de combustion différents et sur des cycles de production avancés, finiront par surpasser les meilleures performances des technologies actuelles.

Le rendement à la production est fortement influencé par les caractéristiques du combustible utilisé, par l'entretien de la centrale électrique et par d'autres facteurs locaux. Les rendements des centrales varient selon le pays et, dans de nombreux pays, sont inférieurs aux valeurs indiquées ici pour les technologies de production d'électricité faisant appel au charbon, au pétrole et au gaz.

On a aussi comparé les coefficients d'émission de CO₂ des divers types de centrales électriques à combustibles fossiles. Les centrales sont de taille analogue (500 mégawatts), les centrales au charbon brûlant le même type de charbon. Ce sont les centrales au charbon qui émettent le plus de CO₂. Elles engendrent un très large éventail

M. Rogner dirige la Section de la planification et des études économiques du Département de l'énergie nucléaire de l'AIEA; M. Khan est membre de la même section. M. Florin Vladu et M. Vladimir Kagramanian, qui font également partie de la Section, ont aussi contribué à cet article.

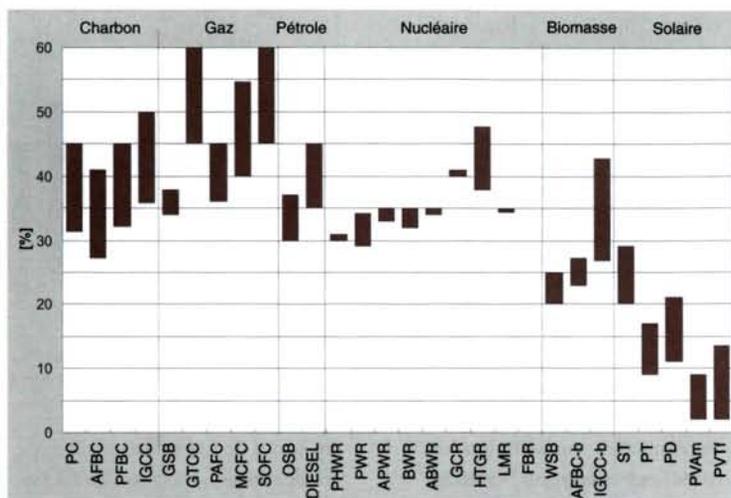
d'émissions de CO₂, ceci en raison des variations du rendement à la production d'électricité.

Les émissions de CO₂ dépendent de la teneur en carbone du combustible (la teneur étant la plus forte dans le cas du charbon, et la plus faible dans celui du gaz naturel), des rendements à la production, des mesures de lutte contre la pollution, intégrées aux divers modèles de centrales, ainsi que d'autres facteurs. Dans le choix des coefficients d'émission, on suppose que les meilleures technologies disponibles et des combustibles de bonne qualité sont employés. Des comparaisons analogues peuvent être faites pour d'autres polluants, notamment SO₂, NO_x et particules.

Les études d'évaluation comparative effectuées au niveau des centrales grâce à la base de données DECADES montrent que, dans de nombreux pays, le nucléaire est concurrentiel pour la production d'électricité. On a comparé les investissements totaux exigés par divers types de centrales dans plusieurs pays. (Voir le graphique page suivante.) Comme on pouvait s'y attendre, l'investissement total nécessaire par unité de capacité varie selon le pays, la fourchette n'étant cependant pas de grande ampleur pour les technologies analogues.

Comparaison des filières énergétiques. On a comparé les maxima et les minima des émissions de gaz à effet de serre dans la production de l'électricité par les diverses filières, c'est-à-dire avec des combustibles solides, liquides et gazeux, grâce à l'énergie hydraulique, nucléaire, éolienne et solaire et par des sources d'énergie renouvelables. En prenant en compte l'intégralité des filières énergétiques en amont et en aval de la production d'électricité elle-même, on a constaté que l'énergie nucléaire émettait entre 40 et 100 fois moins de dioxyde de carbone que les filières actuelles à combustibles fossiles. (Voir le graphique page 5.) Les émissions de gaz à effet de serre de la filière nucléaire sont pour l'essentiel

COMPARAISON DU RENDEMENT NET A LA PRODUCTION DES DIVERSES TECHNIQUES DE PRODUCTION DE L'ELECTRICITE



Combustibles fossiles: PC= Charbon pulvérisé AFBC= Combustion en milieu atmosphérique sur lit fluidisé PFBC= Combustion sur lit fluidisé sous pression IGCC= Cycle combiné à gazéification intégrée GSB= Chaudière à vapeur au gaz GTCC= Cycle combiné à turbines à gaz PAFC= Cellule de combustible à l'acide phosphorique MCFC= Cellule de combustible à carbonate fondu SOFC= Cellule de combustible à oxydes solides OSB= Chaudière à vapeur à mazout DIESEL= Moteur diesel
Energie nucléaire: PHWR= Réacteur à eau lourde sous pression PWR= Réacteur à eau sous pression APWR= Réacteur avancé à eau sous pression BWR= Réacteur à eau bouillante ABWR= Réacteur avancé à eau bouillante GCR= Réacteur refroidi par gaz HGCR= Réacteur à haute température refroidi par gaz LMR= Réacteur à métal liquide FBR= Surgénérateur
Biomasse et solaire: WSB= Chaudière à vapeur à bois AFBC-b= Combustion sur lit fluidisé en milieu atmosphérique alimentée par la biomasse IGCC-b= Cycle combiné à gazéification intégrée alimentée par la biomasse ST= Solaire thermique PT= Miroir parabolique à foyer tubulaire PD= Miroir parabolique PVAm= Photovoltaïque amorphe PVTI= Photovoltaïque à couche mince.

dues à l'utilisation de combustibles fossiles aux stades de l'extraction, du traitement et de l'enrichissement de l'uranium, ainsi qu'aux combustibles utilisés pour la fabrication de l'acier et du ciment destinés à la construction des réacteurs et des installations du cycle du combustible. Ces émissions, négligeables par rapport à celles dues à l'utilisation directe des combustibles fossiles pour la production d'électricité, peuvent être réduites plus encore en améliorant le rendement énergétique. Au stade de l'enrichissement, ces améliorations consistent, notamment, à remplacer la diffusion gazeuse par des procédés consommant moins d'énergie, tels que la centrifugation ou la séparation isotopique par laser. Parmi les filières à combustibles fossiles, c'est le gaz naturel qui est entaché de la plus grande incertitude, surtout en raison

de la diversité des hypothèses relatives aux rejets de méthane dans l'atmosphère pendant le forage, l'extraction et le transport du gaz naturel.

On peut faire remarquer que, dans le cas du nucléaire, les coûts liés aux mesures de sûreté, à la gestion des déchets radioactifs et au déclassement des installations sont internalisés. Ceci signifie qu'ils sont inclus dans le prix de l'électricité d'origine nucléaire. Par contre, les coûts liés aux atteintes à l'environnement et à la santé dues aux autres filières énergétiques ne sont pas encore entièrement internalisés, en partie parce qu'il est difficile de les quantifier.

Expansion des systèmes de production. Les outils informatiques du projet DECADES peuvent servir à définir des schémas d'expansion des

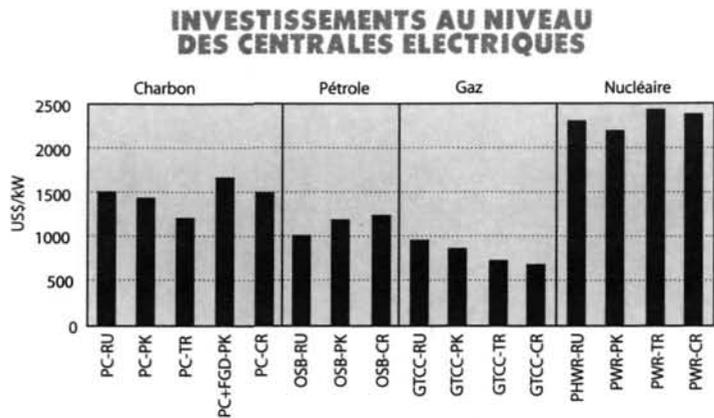
systèmes de production d'électricité les moins dommageables à l'environnement et les moins coûteux, ou encore à déterminer si tel ou tel projet cadre avec le plan de développement à long terme et à moindre coût d'un pays ou d'une région. En mode itératif, ils permettent aussi d'étudier les méthodes les moins coûteuses, de réduire les charges environnementales (par exemple, système permettant d'atteindre au moindre coût les objectifs de réduction des émissions de SO₂ ou de gaz à effet de serre).

On optimise le plan d'expansion en prenant en considération les investissements requis, les coûts d'exploitation et d'entretien, le coût du combustible, le coût du maintien des stocks de combustible et le coût de l'énergie non distribuée. Dès qu'un plan optimal d'expansion est au point, le logiciel permet de calculer les émissions atmosphériques, la surface des terrains nécessaires ainsi que la production des déchets solides, par année et par étape, et pour chacune des filières énergétiques du système, de telle sorte que l'on peut calculer les totaux pour l'ensemble du système.

ETUDES DE CAS

Pendant la première phase du projet DECADES, 22 études de cas de pays, basées sur une évaluation comparative des diverses stratégies et politiques en matière de production d'électricité, ont été effectuées avec le soutien de l'AIEA dans le cadre d'un projet de recherche coordonnée (PRC).

Les études de cas visaient à identifier des stratégies de production d'électricité répondant aux objectifs de protection de l'environnement, et en particulier de réduction des émissions atmosphériques à un coût acceptable. Des questions très variées ont été abordées. Il s'agissait notamment du rôle que le nucléaire pourrait jouer dans la réduction des



Note: RO = Roumanie; PK = Pakistan; TR = Turquie; HR = Croatie
 Abréviations des techniques: voir la note du graphique page 3. Source: CSDB

émissions de gaz à effet de serre; des incidences de la taxation du CO₂ et/ou des contraintes imposées en matière d'émission sur la combinaison des sources d'énergie à l'avenir; enfin, de l'impact que la privatisation et la déréglementation du secteur de l'électricité ont sur les stratégies d'expansion des systèmes de production.

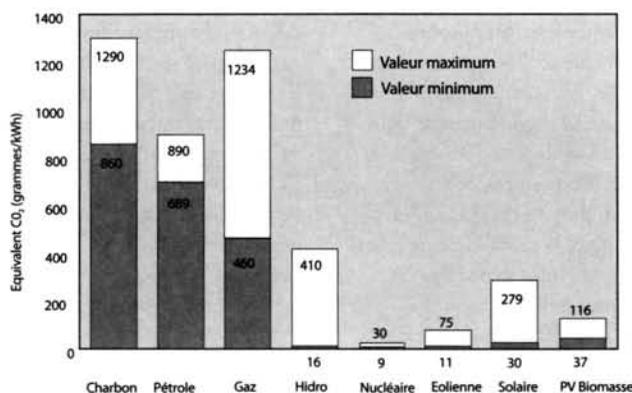
On peut réduire considérablement les émissions et autres charges environnementales en augmentant le rendement des installations existantes, et ce à divers niveaux des filières énergétiques. On a souvent

constaté que la modernisation des centrales existantes, notamment par l'installation d'équipements antipollution, permettait, avec un bon rapport coût-efficacité, d'atténuer les impacts sur la qualité de l'air localement et ceux de l'acidification au plan régional. L'amélioration du rendement général des systèmes de production par le développement de la production mixte est considérée par de nombreux pays comme une option d'un bon rapport coût-efficacité, surtout lorsque des réseaux de distribution de chaleur

UNIR LES EFFORTS POUR

Neuf organisations internationales se sont unies en 1992 pour lancer le projet interinstitutions relatif aux bases de données et aux méthodologies d'évaluation comparative des diverses sources d'énergie pour la production d'électricité (projet DECADES). Ce sont l'AIEA, la Commission européenne, la Commission économique et sociale pour l'Asie et le Pacifique (CESAP), l'Institut international d'analyse de systèmes appliquée (IIASA), la Banque mondiale (BIRD), l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE/AEN), l'Organisation des pays exportateurs de pétrole (OPEP), l'Organisation des Nations unies pour le développement industriel (ONUDI) et l'Organisation météorologique mondiale (OMM). Le projet vise à faciliter l'élaboration de stratégies énergétiques durables faisant partie intégrante de la planification et de la prise de décisions dans le secteur de l'électricité. Il a permis de créer des bases de données technologiques, d'élaborer des outils d'analyse, d'assurer une formation et d'apporter un soutien aux pays en développement pour la réalisation d'études d'évaluation comparative. Les outils informatiques DECADES consistent en bases de données et logiciels d'analyse.

EMISSIONS EN EQUIVALENT CO₂ DES FILIERES DE PRODUCTION D'ELECTRICITE



sont déjà en place pour le chauffage urbain.

La plupart des études sur le développement de la capacité montrent que le nucléaire est d'un bon rapport coût-efficacité pour la réduction des émissions de SO₂, NO_x, CO₂ et autres gaz à effet de serre. En Roumanie par exemple, on a examiné, dans le cadre de l'étude de cas, deux scénarios de développement de la capacité de production, l'un en recourant au gaz et l'autre au nucléaire. Les résultats de l'étude montrent qu'il est possible d'obtenir une forte baisse des émissions de CO₂

en utilisant les centrales nucléaires pour accroître la capacité de production sans augmentation sensible du coût total de l'expansion du système de production. Dans le cas du gaz, bien que les émissions de CO₂ soient moindres qu'avec le charbon, elles n'en augmentent pas moins très sensiblement au cours de la période étudiée. Les émissions de SO₂ baissent dans les deux scénarios; cependant, avec le nucléaire la baisse est d'environ 30 % plus forte qu'avec le gaz.

Certaines études montrent aussi que, bien que les objectifs de réduction des émissions de CO₂

puissent être atteints sans recours au nucléaire, y avoir recours permettrait de faire baisser sensiblement les coûts. On peut faire remarquer que la mise en oeuvre de mesures et de politiques de protection de l'environnement alourdira probablement le coût de l'électricité produite par les centrales à combustibles fossiles qui devront se conformer à ces réglementations. De plus, les préoccupations suscitées par le changement du climat de la planète amènent nombre de pays à envisager des politiques, telles que la taxation du carbone, qui ne manqueront pas d'influer sur la compétitivité des combustibles fossiles pour la production d'électricité. Dans le cas de la Roumanie, et sur la base d'un recours accru au nucléaire, le coût de la réduction des émissions de CO₂ est de 5 dollars E.-U. par tonne de CO₂, ou 18 dollars E.-U. par tonne de carbone, ce qui se situe à l'extrémité basse de la fourchette (entre 0 et 120 dollars E.-U. par tonne de carbone selon le deuxième rapport d'évaluation du GIEC).

Dans la plupart des études de cas, les centrales à cycle combiné au gaz naturel — qui sont très attrayantes du point de vue du rendement à la production (55% ou plus), des investissements requis et de la brièveté des délais de construction — ont été considérées comme une solution possible pour l'expansion du système de production. D'autres facteurs doivent cependant être pris en compte dans l'étude de cette option. Ce sont notamment la sécurité des approvisionnements des pays obligés d'importer le gaz, les fluctuations potentielles du prix du gaz, ainsi que la contribution aux émissions de gaz à effet de serre provenant du dioxyde de carbone pendant la combustion, ainsi que du méthane pendant la production et le transport du gaz.

La coopération instaurée grâce à ce PRC — auquel participent des spécialistes ayant une formation scientifique diversifiée et venant de divers pays — s'est avérée extrêmement précieuse et efficace.

LA PLANIFICATION ENERGETIQUE

Ils peuvent servir à évaluer les compromis toujours possibles entre les caractéristiques techniques, économiques et environnementales des diverses méthodes de production d'électricité, ainsi qu'entre les filières et les systèmes aux niveaux national, régional et international.

Deux types de bases de données technologiques ont été créés: la base de données technologiques de référence (RTDB), et les bases de données propres aux pays (CSDB). La RTDB contient un ensemble exhaustif et harmonisé de données techniques, économiques et environnementales sur les filières faisant appel aux combustibles fossiles, au nucléaire et aux sources d'énergie renouvelables pour la production d'électricité. Elle contient des données sur environ 300 techniques, caractérisées en fonction de leur degré de maturité. Dans les CSDB se trouvent des données sur les techniques de production d'électricité dans divers pays ou régions, données permettant de procéder à des études de cas grâce aux logiciels d'analyse DECADES ou à d'autres outils de planification nationale. Plus de 25 pays se sont dotés d'une CSDB, lesquelles portent au total sur plus de 2 500 techniques.

En particulier, la coopération et l'échange d'informations et de données d'expérience entre diverses équipes confrontées aux mêmes problèmes — tels que la collecte des données, la description des technologies, la définition et la comparaison des filières énergétiques et l'analyse des systèmes de production d'électricité — ont abouti à la définition et à l'application de méthodes communes de résolution des problèmes. La participation d'experts dans les domaines de l'analyse des systèmes de production d'électricité, de la macro-économie et de l'évaluation de l'impact environnemental a fait prendre conscience de la nécessité de réconcilier les diverses préoccupations et priorités — par exemple, la diminution des impacts environnementaux locaux et mondiaux, et l'étude des questions économiques, sociales et de sécurité des approvisionnements — dans le contexte d'une évaluation exhaustive des solutions possibles.

DECADES - PHASE II

La deuxième phase du projet DECADES (1996-2000) est axée sur la diffusion des outils informatiques actuels, sur la formation des utilisateurs à leur application, sur le soutien aux études effectuées par les pays et sur la création de nouvelles capacités d'analyse.

Les outils informatiques DECADES vont être développés afin de pouvoir étudier de manière plus approfondie les questions d'évaluation d'impact et d'intégration des indicateurs d'impact au processus de prise de décisions. Les améliorations en cours concernent notamment la représentation des dommages à la santé et à l'environnement ainsi que des coûts extérieurs, le renforcement des moyens en matière d'analyse réglementaire, les options de gestion de la demande, les unités multicom bustibles et les systèmes de

production conjointe de chaleur et d'électricité.

L'évaluation comparative des filières complètes (de la source au consommateur) des diverses sources d'énergie et techniques de conversion est fondamentale pour l'élaboration de stratégies durables d'approvisionnement en énergie. Grâce au projet DECADES, on a mis en place la méthodologie et les outils permettant de réaliser ces évaluations et la diffusion des résultats auprès des Etats Membres de l'AIEA est un processus continu. Des ateliers interrégionaux ayant pour thème l'emploi des outils informatiques DECADES se sont tenus au Laboratoire national d'Argonne, aux Etats-Unis (1995 et 1996), en Pologne (1996) et au Brésil (1997). Par ailleurs, des séminaires et des ateliers se sont tenus au Canada, aux Etats-Unis, au Royaume-Uni, au Brésil et en République de Corée. Le vif intérêt manifesté par les établissements, les organisations et les universités des Etats Membres ayant pris part à ces manifestations constitue un bon indicateur de l'utilité de la méthodologie DECADES.

Les études d'évaluation comparative basées sur la méthodologie DECADES montrent que l'énergie nucléaire peut, du point de vue économique, être compétitive par rapport à d'autres options de production d'électricité en charge de base, et que ses émissions de SO₂, de NO_x et de CO₂ sont très sensiblement inférieures à celles de toutes les options à combustibles fossiles. Dans les pays ayant l'infrastructure voulue, c'est le gaz naturel qui est l'option favorite pour la production d'électricité, même si le gaz est importé. Les centrales au charbon peuvent être intéressantes dans les pays qui ont accès à des approvisionnements bon marché. Toutefois, leur compétitivité économique risque d'être remise en question par un renforcement des réglementations et des normes de

protection de l'environnement contraignant à installer des dispositifs de lutte contre la pollution et limitant les émissions de gaz à effet de serre. Pour la plupart, les sources d'énergie renouvelables présentent d'intéressantes perspectives pour une production d'électricité sans danger pour l'environnement. Néanmoins, sauf pour l'énergie hydroélectrique classique, leur rôle dans la production d'électricité à grande échelle pourrait être limité par des contraintes physiques dans certaines régions. De plus, il est peu probable que sur le plan économique elles puissent concurrencer les combustibles fossiles dans la production d'électricité en charge de base ou le nucléaire à court et moyen termes.

Pour aider davantage de pays à procéder à leurs propres études, l'Agence a l'intention de développer sa capacité d'analyse objective dans le domaine des évaluations comparatives des sources d'énergie. Une intensification de la coopération avec d'autres organisations dans le domaine de l'énergie est prévue, notamment avec l'Agence pour l'énergie nucléaire, la Commission européenne, la Banque mondiale, l'Organisation des pays exportateurs de pétrole et l'Agence internationale de l'énergie. Dans le contexte du système des Nations Unies, l'Agence va par ailleurs poursuivre ses travaux en vue d'un examen objectif de toutes les options énergétiques.

Se fondant sur les résultats de ses analyses d'évaluation comparative, l'AIEA s'est fixé pour but de participer activement à la préparation du troisième rapport d'évaluation du GIEC. Dans les deux à trois ans à venir, ce rapport constituera une importante plateforme scientifique qui permettra de définir les politiques à mettre en oeuvre en ce qui concerne les changements climatiques et l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre. □