



Article : 053

Vers un système électrique peu carboné au Mexique

M. ISLAS-SAMPERIO Jorge et K. GRANDE-ACOSTA Genice

oct.-15

Niveau de lecture : Facile

Rubrique : Histoire mondiale de l'énergie

La tendance à la hausse de la demande d'électricité dans le monde s'explique par un recours de plus en plus fréquent des activités économiques et sociales à cette source d'énergie ainsi que par un plus grand accès des pays en développement au fluide électrique. L'électricité est essentiellement produite à partir de pétrole, de charbon et de gaz naturel¹ et contribue donc fortement à l'émission de gaz à effet de serre (GES). En effet, ces dernières décennies, les émissions mondiales de GES liées à la production d'électricité ont augmenté de 2,6% par an pour atteindre les 12 481 milliards de tonnes (Gt) d'équivalent CO₂ en 2010, ce qui représente 41% des émissions totales liées à la consommation d'énergie². Selon ces tendances, les émissions de GES liées au secteur électrique continueront d'augmenter à l'échelle mondiale³ de manière significative jusqu'en 2025 pour atteindre les 20 112 Gt de CO₂.

Devant un tel panorama, l'utilisation des sources d'énergie renouvelables (EnR) dans la production d'électricité, comme facteur de découplage entre la production d'électricité et l'émission de GES, semble pertinente. Bien que les technologies utilisant les énergies renouvelables arrivent peu à peu à maturité, aussi bien sur le plan technologique que commercial⁴, celles-ci doivent encore faire face à des obstacles importants comme la reconnaissance des externalités négatives des combustibles fossiles ainsi que la mise en place de sources et de mécanismes financiers spécifiques, qui freinent l'intégration de ces énergies dans les systèmes électriques notamment.

1. Les EnR dans la production d'électricité au Mexique en 2010

Au Mexique, le secteur électrique suit la tendance mondiale. Ces dernières décennies ont en effet été marquées par la prédominance des combustibles fossiles qui représentent 83% des ressources énergétiques totales du pays en 2010⁵. Les émissions de GES liées à ce secteur sont donc importantes. Elles s'élevaient en effet cette même année à 115 millions de tonnes (Mt) de CO₂, ce qui représente près de 23% des émissions liées à la consommation totale d'énergie (505 Mt CO₂) et un peu plus de 15% des émissions globales du pays (748 Mt CO₂)⁶. Si le Mexique souhaite s'engager sur la voie d'un système énergétique à faible émission de carbone, il devra inéluctablement procéder à une décarbonisation du secteur électrique.

La prédominance des combustibles fossiles est pour le moins surprenante quand on sait que le Mexique possède un potentiel d'énergies renouvelables exceptionnel⁷, potentiel qu'il exploite peu au vu des capacités de production d'électricité à partir des sources d'énergie renouvelables (EnR) en 2010 (tableau 1)⁸.

¹ Freris, L., & Infield, D., 2008. *Renewable Energy in Power Systems*. UK: Wiley.

² International Energy Agency (IEA), 2012. *World Energy Outlook*, IEA. Paris, France. Dans la suite du texte, toutes les émissions de CO₂ représenteront des GES en équivalent CO₂.

³ International Energy Agency (IEA), 2012. *World Energy Outlook*, IEA. Paris, France. Dans la suite du texte, toutes les émissions de CO₂ représenteront des GES en équivalent CO₂.

⁴ Grubb, M., T. Jamasb, Pollit, M., 2008. *Delivering a low carbon electricity system: technologies, economics and policy*. Cambridge University Press.

⁵ Islas, J. & Grande, G., 2013. Sector Eléctrico: identificación de acciones y medidas de mitigación de GEI. Reporte Final elaborado en el marco del proyecto CONACyT-SENER Sustentabilidad Energética "Evaluación económica y ambiental de escenarios al 2030 de la inserción de fuentes alternas de eficiencia energética en el sistema energético mexicano en base a potencial de reducción de GEI", México.

⁶ Instituto Nacional de Cambio Climático (INECC), 2013. *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2010*. INECC, México.

⁷ Islas, J., Hernández, H., Manzini, F., & Macías, P., 2004. *Nuevas energías renovables: Una alternativa energética sustentable para México*. Análisis y propuesta. Instituto de Investigaciones Legislativas del Senado de la República, México.

⁸ Secretaría de Energía (SENER), 2011. *Prospectiva de Energías Renovables 2011-2025*. SENER, México.

Tableau 1 : Capacité installée des centrales produisant de l'électricité à partir d'EnR

Technologie de production	Total (MW)
Hydroélectrique > 30 MW	11 126
Hydroélectrique < 30 MW	344
Géothermiques	965
Centrales éoliennes	425
Biomasse*	504
Solaire photovoltaïque	3,49
Total	13 368

*/ Inclut les centrales produisant de l'électricité à partir de bagasse de canne à sucre et de biogaz. Source : [8]

Les options assurant la décarbonisation du secteur électrique doivent agir aussi bien sur la demande que sur l'offre d'électricité. Elles comportent donc d'un côté des mesures d'Economie et d'Utilisation Efficace de l'Electricité (EUEE) afin de réduire la demande en électricité et de l'autre un développement soutenu sur le territoire de centrales produisant de électricité à partir d'EnR ainsi que l'adoption par certains secteurs sociaux et économiques de systèmes de production distribuée d'origine renouvelable afin d'élargir l'offre d'électricité. Il apparait ainsi que la transition vers un secteur électrique à faible émission de carbone est tout à fait viable pourvu que l'on applique vigoureusement les options d'EUEE afin de réduire la demande en électricité et que l'on intègre les EnR dans l'offre électrique. La preuve en est apportée par l'élaboration de scénarios ainsi que par l'analyse coût-bénéfice du scénario de transition vers un secteur électrique à faible émission de carbone.

À cet effet un scénario tendanciel basé sur les perspectives officielles concernant l'évolution de l'offre et de la demande en électricité est comparé à un scénario de transition qui comporte des options d' EUEE ainsi que la mise en place de systèmes de production distribuée destinés aux secteurs de consommation et la commercialisation d'électricité produite à partir d'EnR telles que les énergies éolienne, hydroélectrique, géothermique, thermosolaire, solaire photovoltaïque, la biomasse et le biogaz. La comparaison s'achève par une analyse coût-bénéfice du scénario de transition ainsi qu'une analyse de réduction des émissions de GES permise par chaque scénario. La simulation des évolutions du système électrique est effectuée à l'aide d'un modèle de type *bottom-up*, le Long-range Energy Alternatives Planning (LEAP) qui recrée un équilibre entre l'offre et la demande en électricité⁹.

2. Scénario tendanciel

À en juger par ce scénario tendanciel, le Mexique connaîtra une croissance accélérée de sa demande en électricité durant la période d'analyse, situation qui entraînera un accroissement des besoins du pays en ressources énergétiques de l'ordre de 135 millions de tonnes d'équivalent pétrole (Mtep) en 2035, soit une augmentation de 170% du volume enregistré en 2010. Ce bond résulte de la demande alimentée par la croissance du secteur industriel et du secteur commercial (+5,3%/an), mais également par celle du secteur résidentiel (+4,6%/an) et du secteur de l'énergie, qui comprend

⁹ Heaps, C.G., 2008. Long-range Energy Alternatives Planning (LEAP) system. [Software version 2008.0.0.33] Stockholm Environment Institute: EUA.

les branches pétrolière et gazière (+3,6%) et dans une moindre mesure par celle du secteur agricole (+1,8%/an).

Ce scénario s'articule essentiellement autour des énergies fossiles que sont le gaz et le charbon qui viendront très largement compenser la chute de consommation de fioul provoquée par la fermeture programmée des centrales thermiques fonctionnant à partir de ce combustible tout au long de la période étudiée, ce dernier étant considéré comme l'un des plus gros émetteurs de GES (figure 1). Malgré ces tendances, les émissions de GES par les centrales électriques atteindront 334,4 Mt CO₂ en 2035, ce qui représentera une augmentation de 190% par rapport à 2010. La part du gaz sec dans le volume total des émissions de GES passera de 47% à 59% et celle du charbon de 25% à 38% tandis que celle du fioul chutera de manière drastique, passant de 27% à 1% (figure 1). De même la part des émissions liées au diesel ainsi qu'au coke de pétrole restera marginale puisqu'elle passera de 1% à 3%.

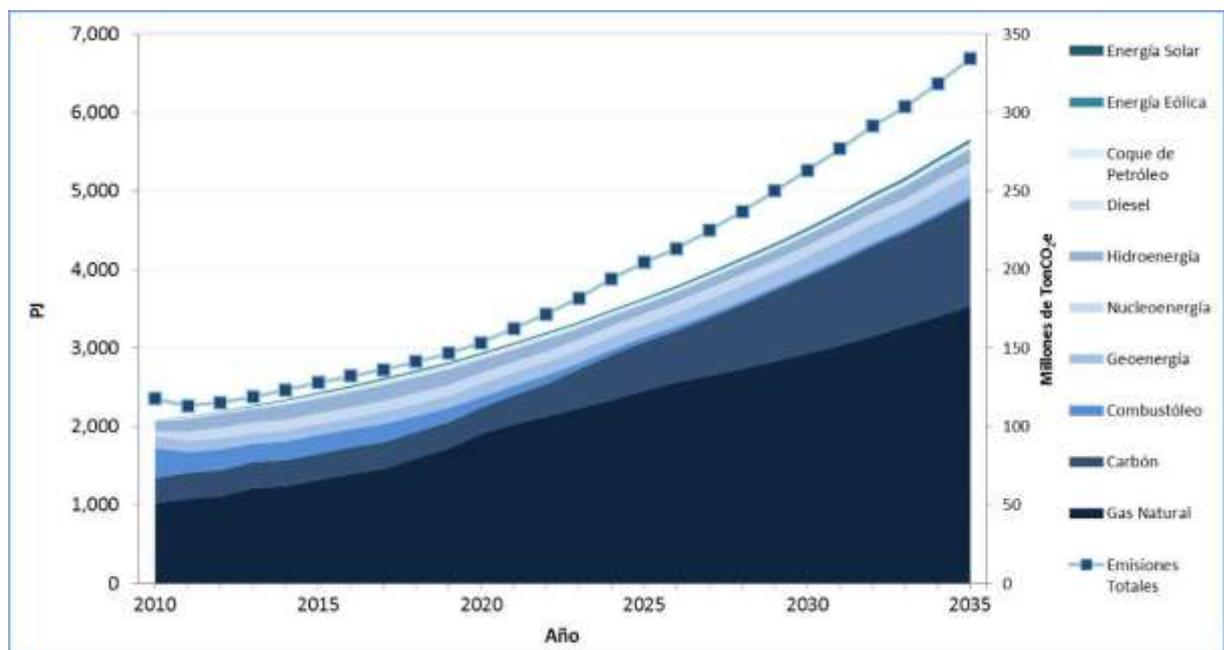


Fig. 1 : Scénario tendanciel du secteur électrique mexicain en fonction de la source d'énergie (PJ) et des émissions de GES (Mt CO₂) - source : élaboration personnelle.

Les centrales à cycle combiné gaz et les centrales à charbon constituent les technologies de prédilection de ce scénario puisque leur capacité augmente respectivement de 5,3% et de 6,1% en moyenne par an. La capacité des centrales thermiques fonctionnant à base de produits pétroliers diminue en revanche de 3,1% en moyenne par an.

Concernant les technologies fonctionnant à base d'énergies renouvelables, la capacité des centrales hydroélectriques (petites installations comprises) augmente en moyenne de 3,1% par an. D'autres filières telles que la géothermie, le vent, l'énergie solaire voient également s'accroître leur capacité de l'ordre de 7,5% par an. La part de ces technologies dans la production d'électricité reste cependant faible. La capacité nucléaire, pour sa part, augmente de 0,7% par an grâce à l'amélioration des centrales existantes.

3. Scénario de transition

L'adoption de mesures d'EUEE dans les différents secteurs de consommation d'électricité conduit à remplacer les équipements électriques existants par d'autres plus efficaces afin de maximiser leur utilisation et inciter au recyclage des matériaux. Est également inclut la production distribuée destinée aux différents secteurs qui peuvent utiliser, par exemple, des petits systèmes photovoltaïques interconnectés permettant la réduction de la consommation d'électricité sur le réseau électrique¹⁰. Le secteur des transports constitue une exception puisque les alternatives proposées prévoient de remplacer les combustibles fossiles par de l'électricité¹¹ ce qui entraîne une hausse de la demande d'électricité dans ce secteur. Les mesures préconisées ainsi que leur impact estimé sur la réduction de la demande d'électricité durant toute la période étudiée sont détaillées sur le tableau 2. Leur mise en place permettrait de réduire le taux de croissance de la demande totale d'électricité de 4,9% (scénario de référence) à 3,2% (scénario de transition).

Tableau 2 : Mesures d'économie et d'usage efficace de l'électricité sélectionnées dans le cadre du scénario de transition.

Secteur	Dispositif d'utilisation finale	Mesure d'économie et d'usage efficace de l'électricité	Réduction de la demande en électricité durant la période (TWh) ¹
Secteur résidentiel	Illumination	Remplacement d'ampoules incandescentes par d'autres fluorescentes	-202
	Réfrigération	Remplacement de réfrigérateurs par d'autres plus efficaces respectant la norme NOM-015-ENER-2012	-148
	Climatisation	Remplacement de systèmes de climatisation par des systèmes électriques plus efficaces et isolation thermique	-111
	Production distribuée	Systèmes photovoltaïques interconnectés*	-6
Secteur commercial	Illumination	Remplacement de lampes conventionnelles par d'autres plus efficaces	-59
	Climatisation	Remplacement de systèmes de climatisation par des systèmes électriques plus efficaces et isolation thermique	-15
Services publics	Éclairage public	remplacement de lampadaires conventionnels par d'autres plus efficaces équipées de LEDS	-27
		Systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau d'éclairage public	-28

¹⁰ Diario Oficial de la Federación (DOF), 2012. Decreto por el que se reforma la fracción II del artículo 1o. de la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética. HCU, México. Disponible en: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5229050&fecha=12/01/2012.

Grande, G., Islas, J., & Rios, M., 2014. *Analysis of domestic high consumption tariff niche market for photovoltaic systems in the mexican household sector. Renewable and sustainable energy reviews*, in press.

¹¹ Islas, J., Manzini, F., & Sánchez, A., 2012. *Diagnóstico sobre la situación actual de la energía solar fotovoltaica y sus aplicaciones en los sectores residencial, público e industrial de México*. Análisis por estado. CIE-UNAM/ONUFI.

	Pompage municipal	Systèmes de pompage municipal photovoltaïques	-13
Secteur des transports	Véhicules automoteurs	Remplacement de véhicules conventionnels par des véhicules électriques équipés de batteries	71
		Remplacement de véhicules conventionnels par des véhicules hybrides électriques connectables	141
	Systèmes électriques	Augmentation des systèmes électriques (Metro)	3
Secteur industriel	Moteurs	Remplacement de moteurs conventionnels par d'autres plus efficaces	-103
	Pompes, ventilateurs, compresseurs d'air	Installation de variateurs de vitesse	-146
	Compresseurs	Mise en place de mesures et élimination des fuites	-56
	Réfrigération	Remplacement de réfrigérateurs conventionnels par d'autres plus efficaces	-28
	Systèmes d'illumination	Remplacement de systèmes d'illumination conventionnels par d'autres plus efficaces	-27
	Systèmes de production et de distribution de chaleur	Utilisation de fours et de chauffages électriques	-35
	Production dans les branches de la sidérurgie, l'aluminium, du verre et du papier	Recyclage de matériaux	-33
	Consommation d'électricité	Cogénération	-287
	Production distribuée	Systèmes photovoltaïques interconnectés	-90
Secteur des hydrocarbures	Compresseurs	Optimisation des systèmes de production de gaz naturel associé et non-associé	-0,3
		Nettoyage de canalisations par l'envoi de racleurs	-0,1
		Mesures in situ afin d'améliorer l'efficacité énergétique	-0,3
		Optimisation de la relation de compression	-1,1
		Ajustement des positions des valves afin de maximiser le fonctionnement du compresseur	-1,1
		Redimensionnement du système de compression afin de minimiser les recirculations	-0,8
		Réglage manuel ou automatique du volume libre du cylindre afin de l'ajuster à la perte du gaz à l'entrée	-0,8

	Ajustement de l'espace mort à une valeur optimale afin d'augmenter l'efficacité du compresseur	-0,8
	Refroidisseurs intra et inter étapes	-1,4

* Cette mesure permet de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire photovoltaïque, ce qui a pour conséquence de diminuer la demande en électricité fournie par le réseau électrique. 1/Se réfère à l'énergie électrique évitée grâce à cette option pendant la période d'analyse. Source : élaboration personnelle.

L'offre d'électricité du scénario de transition répond à la nouvelle demande engendrée par la mise en place de toutes les options présentées dans le tableau 2 et par l'utilisation prépondérante de technologies EnR. La production d'électricité a bien entendu été calculée en tenant compte du potentiel énergétique de EnR du pays.

Toutes les EnR jouent un rôle primordial dans ce scénario : la capacité des centrales photovoltaïques augmente de 67% par an pour atteindre 4 350 MW en 2035 ; celle des centrales éoliennes de 41% par an pour atteindre les 20 085 MW en 2035, étant entendu qu'une partie des centrales hydroélectriques joueront le rôle de centrales d'appoint indispensables pour un crédit de capacité des éoliennes ne dépassant pas 25% ; celle des centrales géothermiques de 11% par an, ce qui représente une capacité installée d'un peu plus de 13 000 MW en fin de période. Les centrales thermo-solaires, enfin, commercialisées un peu plus tard atteignent presque les 1 000 MW, ce qui sous-entend une croissance annuelle de leur capacité de 20%.

Les centrales hydroélectriques (petites installations incluses) enregistrent une hausse moyenne annuelle de 4% de leur capacité pour atteindre les 29 452 MW en fin de période¹². On envisage également une plus grande exploitation de la biomasse, notamment celle produite à partir de déchets grâce aux technologies de combustion directe et de co-combustion dans les centrales à charbon : avec une croissance moyenne annuelle de 18%, cette filière représentera une capacité installée totale de 9 435 MW en 2035. Par ailleurs, l'installation, en fin de période, de systèmes de production d'électricité d'une capacité de 1 228 MW fonctionnant au biogaz issu de déchets solides municipaux (DSM) est également à l'étude. Cette capacité suppose un taux de croissance annuel de 31%. Au total, en 2035, 63% de l'électricité pourrait être produite à partir de sources d'énergie renouvelables.

4. Résultats

En matière de GES, la mise en œuvre du scénario de transition vers un secteur électrique à faible émission de carbone signifierait, d'une part, une baisse de 2 322 Mt de CO₂ de ses émissions sur toute la période, soit une réduction de 46% des émissions de GES cumulées par le scénario tendanciel et, d'autre part, un volume émissions liées au secteur électrique atteignant 92 Mt CO₂ en 2035, ce qui représenterait une diminution de 262% par rapport au scénario de référence pour cette même année (figure 2). La mise en place de ce scénario permettrait également de réduire les émissions de GES liées au secteur électrique de 27% par rapport à 2010. Cette situation viendrait consolider l'effort entrepris par le Mexique pour maintenir ses émissions à un niveau relativement bas.

¹² Une partie des centrales hydroélectriques installées joueront le rôle de centrales d'appoint pour faciliter l'intégration des énergies renouvelables telles l'énergie solaire et éolienne.

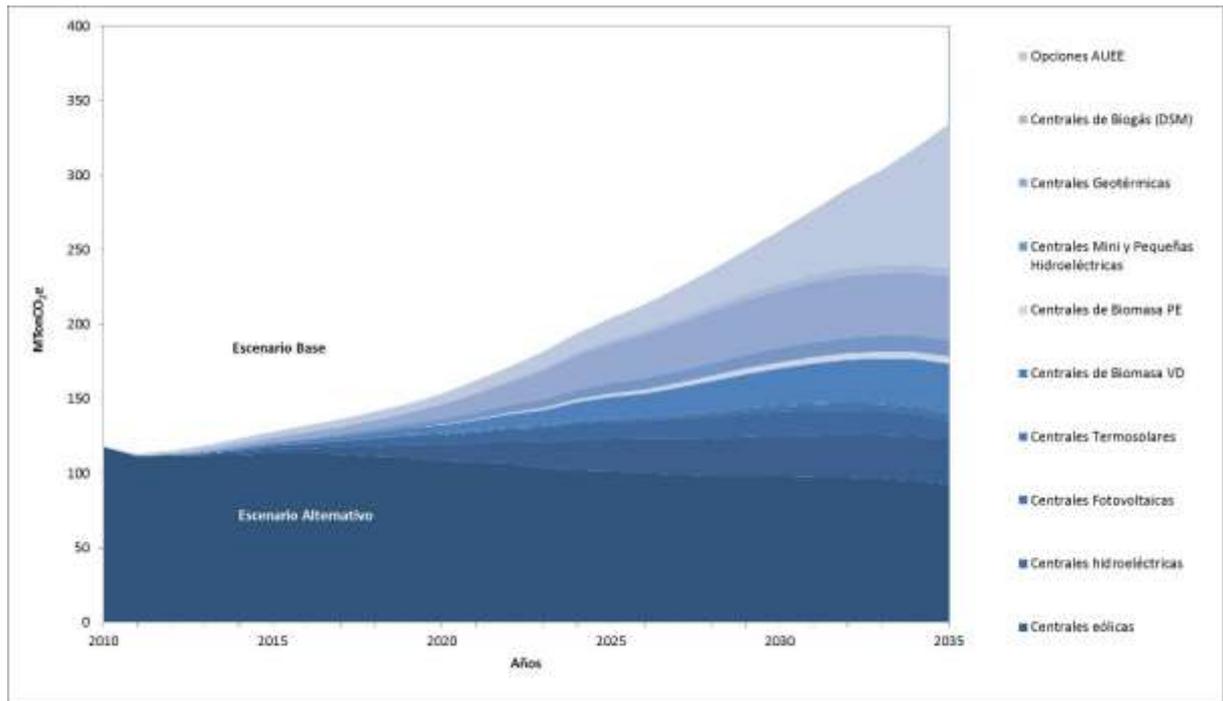


Fig. 2 : Réduction des émissions GES du secteur électrique dans le scénario de transition (Mt CO₂) - source : élaboration personnelle

Il ne suffit pas que ces résultats soient remarquables en termes de réduction des émissions de GES, encore faut-il en connaître le coût. Afin de mesurer l'efficacité environnementale et économique de la substitution technologique, les coûts de réduction par tonne de CO₂ sont fréquemment utilisés. Ils sont estimés en prenant en compte 1/ la différence entre les coûts de production des technologies EnR du scénario de transition et ceux des technologies conventionnelles du scénario de référence qui doivent être remplacées ; 2/ la réduction des émissions de GES causée par la substitution technologique. L'estimation prend en compte les coûts de production traditionnels, à savoir, les coûts en capital, les coûts d'exploitation et les coûts de combustibles, tous ces coûts étant exprimés en valeur actualisée nette à un taux d'actualisation de 10%.

Les résultats de l'intégration de technologies EnR (tableau 3) sont présentés en fonction du type de technologie intervenant dans la production d'électricité. On constate que les technologies, thermiques et solaires photovoltaïques engendrent des frais de réduction de GES, principalement en raison des faibles durées de fonctionnement et des coûts d'investissement élevés qui les caractérisent. De même, les centrales hydroélectriques présentent des coûts pour réduire les émissions de GES car dans le scénario de transition, ces centrales fonctionnent avec des faibles durées d'appel. Ce n'est pas le cas des autres technologies EnR plus compétitives et pour lesquelles le coût total de l'offre électrique prévu dans le scénario de transition s'avère même négatif ce qui se traduit par des bénéfices économiques. Il est important de noter que ces avantages viennent principalement des frais évités de combustibles du scénario de base et dans une moindre mesure des coûts d'exploitation évités provenant de technologies conventionnelles du même scénario.

Tableau 2 : Réduction des émissions de GES et évaluation du coût/bénéfice 2010-2035

	Réduction des émissions (Mt CO ₂)	Coût (+) ou bénéfice (-) net (USD2007/t CO ₂)
Eolienne	400	-0,5
Hydroélectrique	225	3,0
Solaire photovoltaïque	39	42,7
Thermo-solaire	20	23,6
Biomasse produite à partir de déchets	321	-3,2
Biomasse issue de cultures énergétiques	48	-1,5
Mini centrale hydroélectrique	139	-4,3
Géothermique	517	-5,7
Biogaz (DSM)	55	-2,5
Total	1 763	-1,3

Source : élaboration personnelle

Inversement, la mise en œuvre du scénario de transition entrainera nécessairement une série d'investissements progressifs à hauteur de 25 255 millions de US dollars de plus que celle du scénario tendanciel. Le scénario de transition, en dépit de ses avantages écologiques et économiques indéniables, devra donc surmonter l'obstacle d'un coût financier plus élevé de l'ordre d'un peu plus d'un milliard de dollars par an en moyenne sur la période étudiée. De nouvelles sources de financement devront être obligatoirement trouvées, ainsi que de nouveaux systèmes d'incitation tels que les tarifs de rachat (*feed in tariffs*) ou les certificats verts devront être mis en place si l'on veut que l'application de ce scénario soit réaliste.

Récemment le Mexique a adopté une réforme énergétique permettant l'investissement privé dans tout le secteur électrique à l'exception des réseaux électriques dont on attend un accroissement des moyens financiers [notice 045]. Reste à savoir si le Mexique sera capable d'inciter les investissements attendus au profit d'un scénario de transition plutôt que la poursuite d'une croissance de l'utilisation de combustibles fossiles très polluants et dont les ressources sont limitées.